

文章编号 1004-924X(2026)17-2709-13

复合材料电极自刃磨电火花加工硬质合金深窄槽

伍 博¹, 雷建国^{2*}, 陆建勋^{1*}, 徐 斌², 程 涛¹, 伍晓宇¹

(1. 深圳技术大学 城市交通与物流学院, 广东 深圳 518118;

2. 深圳大学 机电与控制工程学院, 广东 深圳 518060)

摘要:硬质合金是一种难切削的高硬导电材料,有时需要在其表面制造阵列功能微结构,以便作为低成本大批量生产的工业模具关键镶件。电火花加工作为上述微结构制造的重要技术手段,加工硬质合金存在工具电极高损耗的技术挑战。本研究基于复合材料电极电火花成形加工定理,提出使用两块高损耗率的箔片子电极粘接夹持一块低损耗率箔片子电极,叠层制作出一种具有自刃磨特征的复合材料电极,然后用于电火花成形加工阵列深窄槽。加工过程中外侧的两块箔片子电极迅速损耗,使得深窄槽的宽度和深度基本由中间低损耗率子电极决定,并且在加工深窄槽的同时自适应地完成工具电极的放电刃磨,从而避免极薄的低损耗率子电极露出过长、发生变形甚至损坏。基于这一原理,制作了 Cu 箔和 H62 黄铜箔构成的复合材料电极,研究了电火花加工合理的开路电压、脉冲频率和 Cu 箔子电极厚度,并且据此加工了深度大于 2.2 mm,深宽比为 12 的密集阵列深窄槽。结果表明,这种自刃磨的复合材料电极非常适合于硬质合金这类难加工材料表面微结构的批量电火花成形加工。

关 键 词:电火花加工;复合材料电极;硬质合金;深窄槽

中图分类号:TG661 **文献标识码:**A

doi:10.3724/OPE.20263417.2709 **CSTR:**32169.14.OPE.20263417.2709

Self-sharpening composite material electrode for die-sinking EDM of deep narrow grooves on cemented carbide

WU Bo¹, LEI Jianguo^{2*}, LU Jianxun^{1*}, XU Bin², CHENG Tao¹, WU Xiaoyu¹

(1. College of Urban Transportation and Logistics, Shenzhen Technology University,
Shenzhen 518118, China;

2. College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

* Corresponding author, E-mail: lei jianguo@szu.edu.cn; lu jianxun@sztu.edu.cn

Abstract: Cemented carbide is a high-hardness, electrically conductive, and difficult-to-machine material that is widely used in cutting-tool inserts and molds for low-cost, high-volume manufacturing. The fabrication of arrayed functional microstructures on cemented-carbide surfaces is often required. Electrical discharge machining (EDM) is a promising method for producing such microstructures; however, severe tool-electrode wear remains a major challenge. Based on the principle of die-sinking EDM using composite material electrodes (CMEs), a self-sharpening CME was developed by bonding and clamping two high-

收稿日期:2026-06-12; **修订日期:**2026-07-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52205399);深圳技术大学自然科学拔尖人才基金资助项目(No. GDRC202426);深圳高端人才启动资助项目(No. 827-000737)

wear-rate electrode foils on either side of a low-wear-rate central foil. The proposed electrode was applied to EDM of arrayed deep narrow grooves. During machining, the outer foil sub-electrodes were preferentially worn, such that the groove width and depth were primarily governed by the central low-wear-rate sub-electrode. Meanwhile, adaptive discharge sharpening occurred during the machining process, preventing excessive exposure, deformation, and fracture of the extremely thin central sub-electrode. A CME composed of Cu foil and H62 brass foil was fabricated based on this design. The effects of open-circuit voltage, pulse frequency, and Cu-foil sub-electrode thickness on EDM performance were investigated. Dense arrays of deep narrow grooves with depths exceeding 2.2 mm and an aspect ratio of 12 were successfully machined. The results demonstrate that the proposed self-sharpening CME is particularly suitable for batch EDM fabrication of surface microstructures on difficult-to-machine materials, such as cemented carbide.

Key words: electrical discharge machining; composite material electrode; cemented carbide; deep narrow groove

1 引 言

现代工业领域的关键零部件表面常常需要布置各种功能微结构,封闭的阵列深窄槽是其中的典型结构^[1]。切削加工可以在有色金属材料表面进行微沟槽的高效加工^[2],通过超声等能场辅助也可以在难切削的高硬材料工件表面加工微沟槽^[3],但受到刀具直径和材料硬度的限制,深宽比都较小。激光加工虽不受工件材料硬度的限制,可以进行表面织构的加工^[4]和具有复杂截面形状的微沟槽加工^[5],但烧蚀排屑等问题的存在导致加工结构难以达到大深宽比且表面质量不高。微细电火花加工是能够在高硬导电零件表面加工封闭深窄槽的重要技术手段。工业界通常使用经过切削粗加工的硬质 Cu 或 W 薄板作为电极坯料,对其进行电火花放电磨削,以制作出薄壁电极,然后用于连续电火花成形加工,从而获得阵列深窄槽。但是加工硬质合金这类工件材料时,连续成形加工累积的薄壁电极损耗很大,因此薄壁电极应有足够长度以补偿损耗。这对电火花放电磨削控制提出了很高要求,电极工作部分越薄和越长,磨削尺寸控制难度越大,并且在后续加工阵列深窄槽的过程中也更容易损坏。针对这一难点, Li 等^[6]使用 Cu 箔电极电火花加工钛合金,获得了平均宽度为 214.30 μm 、深度为 642.33 μm 的微沟槽。

本研究提出一种具有自刃磨特征的复合材料电极电火花成形加工深窄槽的方法,所制作长度不受限制的工具电极可以重复用于加工不同

零件的阵列深窄槽,经得起连续长时间加工的损耗累积。复合材料电极源于叠层微电极技术。Shibayama 等采用热扩散焊来构造含喷液微孔^[7]和微槽^[8]的叠层电极,然后用于电火花加工,可有效清除加工产物,缩短加工时间。Xu 等^[9]使用叠层 Cu 箔,运用弯曲避让式逐层电火花线切割与热扩散焊组合工艺来制备不同形状的三维叠层微电极,并用于高效电火花成形加工三维微结构,但也发现工件加工表面会产生与电极表面 Cu 箔接缝对应的放电痕,影响表面质量。Lei 等^[10]使用镀 Sn 膜 Cu 箔来制备三维叠层微电极,通过 Cu 和 Sn 元素的高温相互热扩散改善了叠层电极接缝的连接质量,从而基本消除接缝放电痕。为将接缝放电痕转变为有益的微细结构, Lei 等将初始外径相同的 Cu 箔和 Sn 箔叠层组合成为 CuSn 复合材料圆盘电极进行旋转电火花加工,利用不同材质的圆盘箔具有不同的损耗率,电极外缘面逐渐损耗形成截面轮廓形状恒定的阵列微结构^[11],这一方法也用于制备超长的 CuSn 复合材料电极,其初始电极工作面仅需要切平,然后用于电火花成形加工微结构^[12]。Tang 等^[13]发现用复合材料电极加工的表面微结构具有极好的热控性能。研究发现复合材料电极电火花成形加工中各个子电极会发生相互影响,使得高损耗率子电极的实际加工损耗率往往低于其单独测试获得的数据^[14]。基于这些实验现象的观察, Wu 等^[15]推导出复合材料电极电火花成形加工定理,证明了任何复合材料电极用于批量电火花成形加工,逐渐演变的加工结构最终必然

收敛于恒定形状。

先前研究的复合材料叠层电极中子电极较多、叠层厚度大,重点用于加工大面积、浅深度的复杂表面微结构。如果用于加工形状简单、大深度的封闭深窄槽反而困难,主要是由于加工碎屑排出不畅,使得沿叠层电极厚度方向越接近外侧加工损耗越大,加工的微结构形貌不一致,并且进给深度越大,材料去除率越低,加工越困难。依据复合材料电极电火花成形加工定理,本研究使用两块高损耗率的箔片子电极粘接夹持一块低损耗率箔片子电极,叠层制作出一种简单的复合材料电极,用于连续电火花成形加工阵列深窄槽,并且在成形加工的同时自适应地完成复合材料电极的放电刃磨,称为自刃磨,低损耗率子电极逐渐露出,而且每轮次加工仅刃磨必要的露出长度,从而避免极薄的低损耗率子电极露出过长而发生变形甚至损坏。与常规在线制备微电极相比,复合材料电极是在电火花成形加工阵列深窄槽过程中同步完成,通过自刃磨保持电极形貌的稳定性,无须额外工序成形电极。

2 实 验

使用 60, 80 和 100 μm 厚度的 Cu 箔, 以及 50 μm 厚度的 H62 黄铜箔作为复合材料电极的子电极原材料。采用 20 μm 厚度的双面导电胶带将外侧两片 H62 黄铜箔与中间一片 Cu 箔叠层粘接作为复合材料电极的原始坯料。以 YG8 硬质合金作为加工阵列窄槽的工件原材料。

图 1 为搭建的实验系统, 包括中国普爱精密科技(常州)有限公司生产的三轴微纳米运动台(型号: M-L02, 运动精度: $\leq \pm 0.6 \mu\text{m}$), 日本 NF 公司生产的双极性电源放大器(型号: HSA42052), 将其与脉冲发生器等辅助装置进行集成, 使用 C# 语言编写操作程序, 通过 USB 连线读取 KeySight 34450A 数字万用表获得的极间电压等电信号, 反馈形成闭环伺服控制的微细电火花加工系统, 限流电阻为 20 Ω 。使用中国杭州华方数控机床有限公司生产的电火花数控线切割机床(型号: HF320MZ0-G19X)将叠层电极原始坯料切割成为复合材料电极, 并将中国德州鑫城

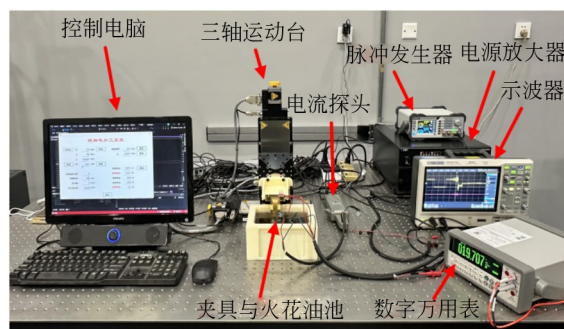


图 1 微细电火花成形加工系统

Fig. 1 Die-sinking micro EDM system

特种油品有限公司生产的火花油(型号: Dielectric 180)作为工作介质。复合材料电极首次对刀后开始全程自动加工, 每加工一条封闭窄槽, 系统记录加工时间, 控制电极移动到下一工位自动对刀, 并且计算出自刃磨露出的 Cu 子电极上轮次加工的损耗长度, 所有轮次加工完成后全部过程数据存储于文件之中, 以供分析解读。

采用中国上海力辰邦西仪器科技有限公司生产的电子分析天平(型号: LC-FA1004)称取工件加工前后的重量, 根据重量差值和加工时间计算材料去除率。相同的工艺参数下重复加工 5 组样品, 数据取平均值并且标记偏差。使用日本 Keyence 公司生产的超景深体视显微镜(型号: VHX-X1F)和美国 Thermo Fisher Scientific 公司生产的场发射扫描电子显微镜(型号: Apreo 2 S HiVac)观测电极和工件样品, 为了保证数据的可比性, 深窄槽几何尺寸测量位置保持一致。

3 工艺方法

图 2 是复合材料电极自刃磨与电火花成形加工深窄槽的过程。首先使用导电胶带将 H62 箔与 Cu 箔叠层粘接形成原始电极坯料, 然后使用电火花线切割工艺将其加工成为复合材料电极, 电极工作面仅需要切平。电极工作部分宽度 $w=8 \text{ mm}$ 、长度 $l=20 \text{ mm}$ 。图 2(a) 为初始电极工作面的 SEM 照片, 由图可见, 子电极与胶带都非常清晰, 粘接质量良好, 其中导电胶带为含有 Cu 粉的树脂纤维, 经历电火花线切割重新凝结的导电胶带沿子电极结合部形成微细毛刺, 后续用于电火花成形加工将很快损耗, 不会产生不利

影响。图 2(b)是初始电极侧面,仅能看到外侧 H62 箔。加工实验表明超薄导电胶带与 H62 箔的损耗率相差不大,为简化表达视其作为 H62 箔的一部分,将复合材料电极表达为 HCuH,其中 Cu 和 H 分别代表 Cu 箔和 H62 箔。也可以加入厚度的微米量纲数据,例如 H70Cu100H70,其中 H70 为 50 μm 厚度的 H62 箔+20 μm 厚度的导电胶带,因此复合材料电极叠层总厚度 240 μm 远大于 Cu100 子电极厚度,结构强度和柔韧性足够且容易校平。使用复合材料电极在工件表面以等距离的工位间隔依序进行负极性电火花成形加工,最终获得窄槽阵列,图 2(c)是对 W4Mo2Cr4VSi 高速钢工件从左至右进行 20 轮次、工位间隔 300 μm 和进给深度 1 mm 的成形加工获得的阵列窄槽横截面,图 2(d)是对应的加工面。采用负极性加工有利于在电极工作面生成保护性炭膜,减少电极损耗^[16]。H 子电极的损耗率远大于 Cu 子电极的损耗率,因此加工出来的窄槽宽度和深度基本由 Cu 子电极所决定,但 H 子电极仍具有轻微加工能力。对于钢材工件的加工,无论是 Cu 子电极还是 H 子电极的损耗相对加工硬质合金工件小得多。H 子电极会在 W4Mo2Cr4VSi 工件顶部加工形成杯形,首轮次加工的杯形较深,随着加工轮次的增加,杯形快速减小,最终收敛成为微细结构,虽然总体无关大局,但对于前几条沟槽形状还是有一定影响。当上述复合材料电极用于加工硬质合金工件时,加工损耗很大,杯形通常不明显。因此本方法更适合于硬质合金这类材料的高损耗加工,加工过程中处于外侧的 H 子电极对中间的 Cu 子电极起到夹持保护作用,但前者加工作用轻微,反而损耗很快,实际上在加工的同时实现了自刃磨。图 2(e)为复合材料电极自刃磨露出的 Cu 子电极,由于每轮次加工仅刃磨必要的长度,因此 Cu 子电极非常平直,图 2(f)为加工之后的复合材料电极工作面,与图 2(a)各个子电极一一对应。

本研究分别制作了 H70Cu60H70, H70Cu80H70 和 H70Cu100H70 三种复合材料电极,为在尽可能小的范围内加工尽可能多的深窄槽,固定加工工位间隔为 300 μm 。以加工的槽宽和壁宽

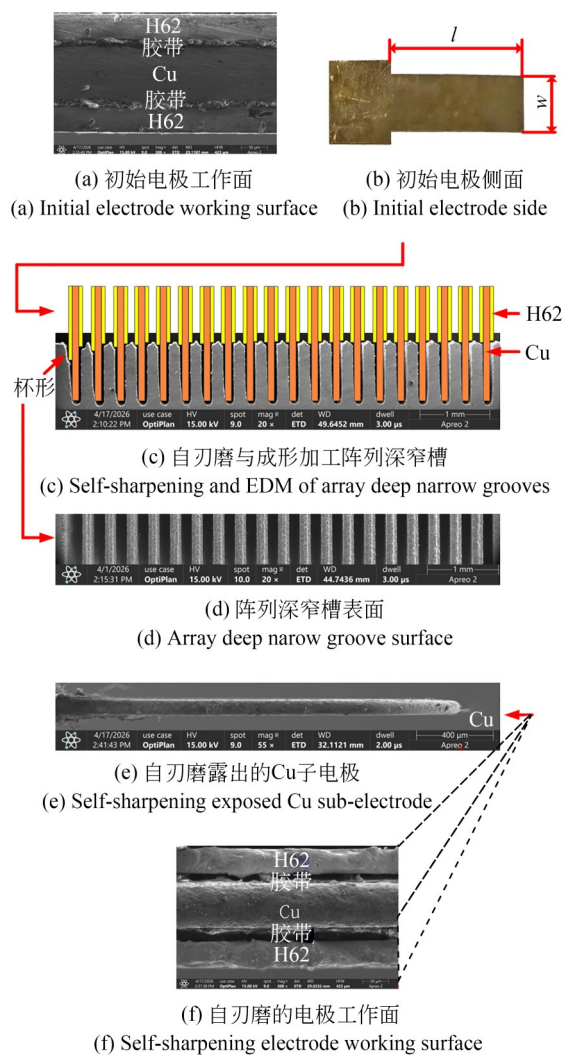


图 2 复合材料电极自刃磨与成形加工

Fig. 2 Self-sharpening and die-sinking EDM with CME

尽可能接近为首要目标,优化开路电压、脉冲频率和 Cu 子电极厚度,确保槽宽和壁宽约为 150 μm 。其次再考虑 Cu 子电极损耗和材料去除率等其它因素,最后使用优化工艺参数加工大深度的阵列窄槽。深窄槽加工的排屑是关键问题之一,与加工稳定性和精度密切相关。本研究将脉冲宽度和脉冲间隔设置为相等,脉冲宽度的增加会导致更多的加工碎屑,而对应的脉冲间隔的增加有利于极间消电离和碎屑排出。

4 结果与讨论

4.1 开路电压的影响

使用 H70Cu100H70 复合材料电极研究开路

电压对成形加工阵列窄槽的影响。设置电极进给深度为 1 mm,脉冲频率为 10 000 Hz,因此脉宽和脉间均为 50 μs 。分别在 80, 100, 120 和 140 V 开路电压下,连续加工 10 条 300 μm 间隔的窄槽,如图 3 所示。

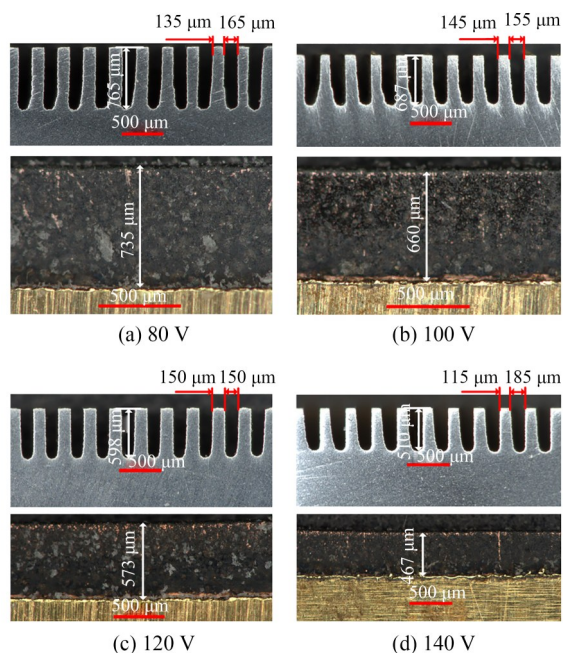


图 3 不同开路电压的加工

Fig. 3 EDM with different open-circuit voltages

当开路电压为 80 V 时(图 3(a)),加工的窄槽深度最大、达 765 μm ,开口附近平均槽宽 165 μm 、壁宽 135 μm ,槽宽大于壁宽 30 μm 。原理上,80 V 加工电压产生的放电能量最小,单边加工间隙 $(165-100)/2=32.5$ μm ,加工时间长,导致加工形状不规则,且槽宽与壁宽的一致性较差。由于外侧 H70 子电极损耗率很大,在窄槽顶部几乎没有杯形浅坑。Cu100 子电极平均每轮次长度损耗 283 μm 、最小,但波动范围较大(270~299 μm),依据复合材料电极电火花成形加工定理,只要加工轮次足够,子电极长度差和加工结构形状必将收敛。在收敛之后的稳定加工阶段,两块 H70 子电极平均每轮次损耗长度也为 283 μm ,这实际也是稳定加工阶段每轮次 Cu100 子电极刃磨长度增量。观测自刃磨露出的 Cu100 子电极长度为 735 μm ,略小于槽深,这

是由于槽深有加工间隙的贡献。材料去除率仅为 0.127 mg/min。当开路电压为 100 V 时(图 3(b)),加工的槽深 687 μm ,开口附近槽宽 155 μm 、壁宽 145 μm ,槽宽仅大于壁宽 10 μm ,单边加工间隙 27.5 μm 。由于 100 V 加工能力更强,加工形状一致性得到明显改善。Cu100 子电极平均每轮次长度损耗增加到 331 μm ,但波动范围较小(324~340 μm)。自刃磨露出的 Cu100 子电极长度减少到 660 μm ,材料去除率增加到 0.144 mg/min。当开路电压为 120 V 时(图 3(c)),加工的槽深 598 μm ,开口附近槽宽与壁宽均为 150 μm ,单边加工间隙仅为 25 μm 。Cu100 子电极平均每轮次长度损耗增加到 410 μm ,波动范围进一步收窄(406~414 μm)。自刃磨露出的 Cu100 子电极长度进一步减小到 573 μm ,材料去除率提升到 0.192 mg/min。当开路电压为 140 V 时(图 3(d)),加工的槽深减小到 510 μm ,开口附近槽宽 185 μm 、壁宽 115 μm ,槽宽大于壁宽达 70 μm 。单边加工间隙达到最大 42.5 μm 。Cu100 子电极平均每轮次长度损耗增加到最大 490 μm ,但波动范围由于放电能量过大又变得较大(482~501 μm)。自刃磨露出的 Cu100 子电极长度减小到 467 μm ,材料去除率为 0.195 mg/min,加工速度最快。

综合分析,当开路电压为 120 V 时,加工的平均槽宽和壁宽相等,波动范围也最小(图 4(a))。随着开路电压的增加,加工的槽深几乎是线性减小(图 4(b)),这主要是由于随着开路电压的增加,Cu100 子电极加工损耗几乎是线性增大(图 4(c))。开路电压较小时,放电能量较低,材料去除率低,随着开路电压的增加,材料去除率随之增加,但 140 V 的开路电压过大,产生的加工碎屑过多,窄槽内排屑不畅,材料去除率增幅变缓(图 4(d))。总体来看,开路电压为 120 V 时,加工的槽宽和壁宽最理想,材料去除率接近最高,虽然这时 Cu100 子电极加工损耗表现中等,导致加工槽深不是最大,但实际运用时可以通过增加进给深度进行补偿,而且大损耗加工更有利于避免深窄槽顶部的杯形,详细见 4.5 节的分析。因此,应选择的开路电压为 120 V。

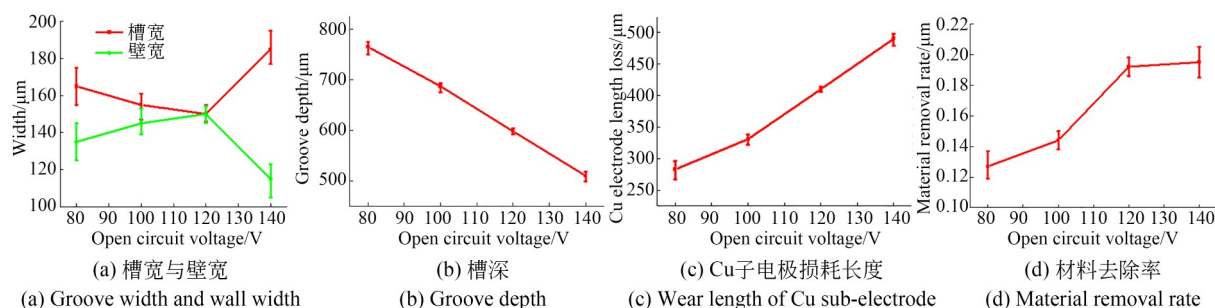


图4 开路电压的影响

Fig. 4 Influence of open-circuit voltage

4.2 脉冲频率的影响

为研究脉冲频率的影响,设置进给深度为 1 mm,开路电压为 120 V。分别在 2 500, 5 000,

10 000 和 20 000 Hz 的脉冲频率下加工阵列窄槽, 10 000 Hz 的加工结果见前文图 3(c), 2 500, 5 000 和 20 000 Hz 的加工结果见图 5。

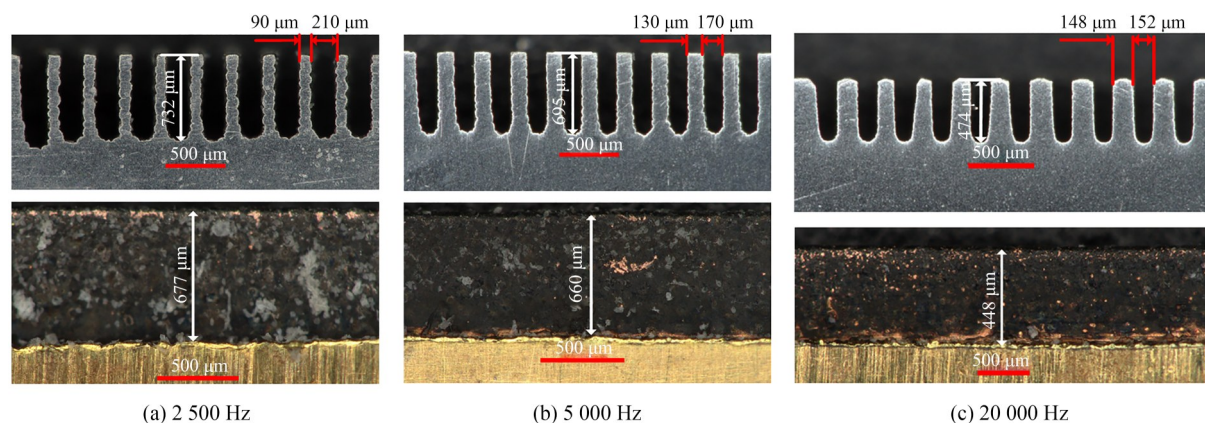


图5 不同脉冲频率的加工

Fig. 5 EDM with different pulse frequencies

当脉冲频率为 2 500 Hz 时(图 5(a)),对应的脉宽和脉间均为 200 μs ,放电能量最大,加工的槽深达到最大 732 μm 。槽宽和壁宽分别为 210 μm 和 90 μm ,槽宽比壁宽大 120 μm ,因此壁宽太小容易拆断,而且表面很粗糙。开口处单边加工间隙为 55 μm ,最大。长脉宽加工在电极上沉积的抗损耗炭层厚实,使得 Cu100 子电极平均每轮次长度损耗仅为 263 μm ,最小,波动为 254~276 μm 。自刃磨露出的 Cu100 子电极长度为 677 μm ,最长。高能量放电下材料去除率为 0.222 mg/min,加工速度最快。当脉冲频率为 5 000 Hz 时(图 5(b)),对应的脉宽和脉间均为 100 μs ,放电能量次于前者,加工的槽深减小到 695 μm ,槽宽减小到 170 μm ,壁宽增大到 130 μm ,槽宽比

壁宽大 20 μm 。单边加工间隙减小到 35 μm 。Cu100 子电极平均每轮次长度损耗增加到 315 μm ,波动为 310~319 μm 。自刃磨露出的 Cu100 子电极长度为 660 μm 。材料去除率为 0.222 mg/min,加工速度没有明显变化。当脉冲频率为 20 000 Hz 时(图 5(c)),对应的脉宽和脉间均为 25 μs ,放电能量最小,加工的槽深减小到最小值 474 μm 。槽宽为 152 μm ,壁宽为 148 μm 。单边加工间隙仅为 27 μm 。25 μs 短脉宽下抗损耗炭层难以形成,使得 Cu100 子电极平均每轮次长度损耗 462 μm ,接近进给深度的一半,波动为 457~468 μm 。自刃磨露出的 Cu100 子电极长度为 448 μm ,最小。材料去除率为 0.103 mg/min,加工速度最慢。

综合分析,随着脉冲频率的增加,放电能量越来越小,总体上导致加工的槽宽越来越小,壁宽越来越大(图 6(a)),但脉冲频率为 20 000 Hz 时,加工速度过慢,导致槽宽又略有增加。脉冲频率为 10 000 Hz 时,加工的平均槽宽和壁宽相等(图 3(c))。随着脉冲频率的增加,加工的槽深逐渐减小(图 6(b)),这主要是由于频率越大,即脉宽越小,负极性加工在电极工作面形成的抗损耗炭层越弱,Cu 子电极长度损耗越大,50 μs 脉宽

是临界点,脉宽小于 50 μs 时抗损耗炭层形成困难^[17],Cu 子电极损耗进一步增大,导致加工的槽深进一步减小(图 6(c))。脉冲频率较小时,放电能量较大,材料去除率高,随着脉冲频率的增加,材料去除率随之减小(图 6(d))。总体而言,尽管当脉冲频率为 10 000 Hz 时,在加工的槽深、Cu 子电极长度损耗和材料去除率方面均表现中等,但是其综合加工效果,尤其是加工的槽宽和壁宽最合适,因此还是应当优先选择。

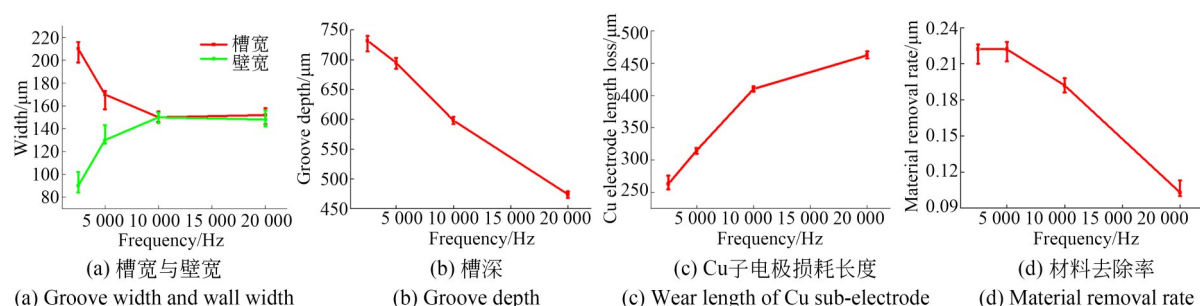


图 6 脉冲频率的影响

Fig. 6 Influence of pulse frequency

4.3 Cu 箔子电极厚度的影响

为研究 Cu 子电极厚度的影响,设置电极进给深度为 1 mm,开路电压为 120 V,脉冲频率为 10 000 Hz。分别使用 H70Cu60H70, H70Cu80H70 和 H70Cu100H70 复合材料电极加工阵列窄槽, H70Cu100H70 的加工结果见前文图 3(c), H70Cu60H70 和 H70Cu80H70 的加工结果见图 7。

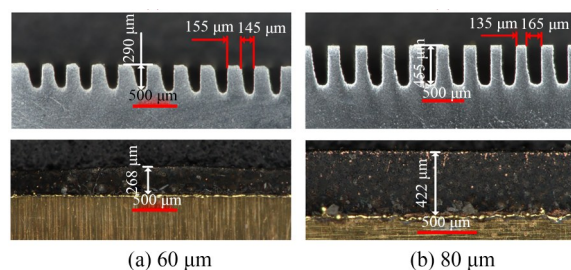


图 7 不同 Cu 子电极厚度的加工

Fig. 7 EDM of different Cu sub-electrode thicknesses

使用 H70Cu60H70 时(图 7(a)),加工的槽深仅为 290 μm ,说明 Cu60 子电极对硬质合金的加工能力很弱,加工的槽宽为 145 μm 、壁宽为

155 μm ,槽宽小于壁宽 10 μm 。单边加工间隙仅为 22.5 μm 。Cu60 子电极平均每轮次长度损耗 640 μm ,非常大,波动为 614~653 μm ,也非常大。自刃磨露出的 Cu60 子电极长度仅为 268 μm 。材料去除率为 0.031 mg/min ,加工速度非常慢。使用 H70Cu80H70 时(图 7(b)),加工的槽深增加到 455 μm ,槽宽 165 μm 、壁宽 135 μm ,槽宽大于壁宽 30 μm 。单边加工间隙 32.5 μm 。Cu80 子电极平均每轮次长度损耗急剧减小到 535 μm ,波动变为 521~544 μm 。自刃磨露出的 Cu80 子电极长度增加到 422 μm 。材料去除率为 0.118 mg/min ,加工速度虽然大幅增加,但仍然很慢。

综合分析,Cu100 子电极加工能力最强,其加工的槽宽和壁宽也最均衡(图 8(a)),而 Cu60 子电极加工能力弱,加工的槽深很浅,也正是槽深浅使得排屑并不困难,因此加工间隙小。Cu80 子电极虽然厚度增加不多,但加工能力明显增强,加工的槽深增加很多,但也造成排屑困难,且加工速度仍然较慢,导致单边加工间隙增加较多,使得槽宽远大于壁宽。随着 Cu 子电极

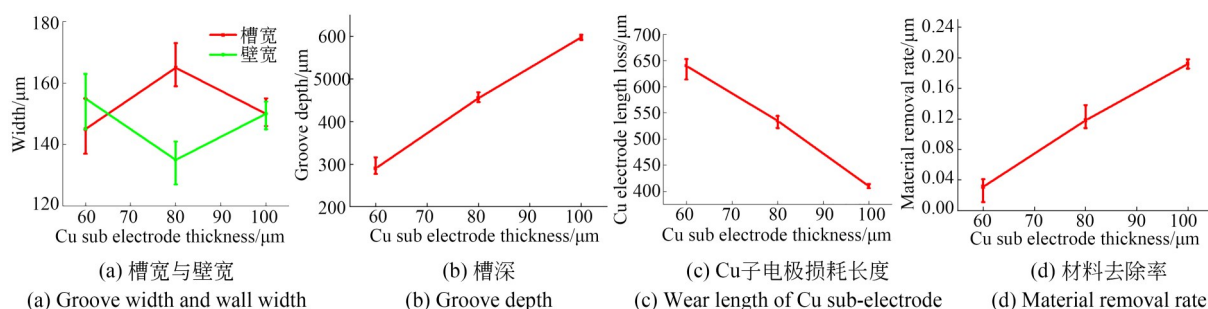


图8 Cu子电极厚度的影响

Fig. 8 Influence of Cu sub-electrode thicknesses

厚度的增加,加工的槽深基本线性增加(图8(b)),这主要是由于随着Cu子电极厚度的增加,依据尺寸效应其长度损耗越来越小^[18],而且基本呈线性变化(图8(c))。随着Cu子电极厚度的增加,由于加工能力越来越大,材料去除率也基本呈线性增加(图8(d))。总体而言,Cu100子电极加工的槽深、Cu子电极长度损耗和材料去除率方面的表现均优于Cu60和Cu80子电极。因此,应当优先选择H70Cu100H70复合材料电极。

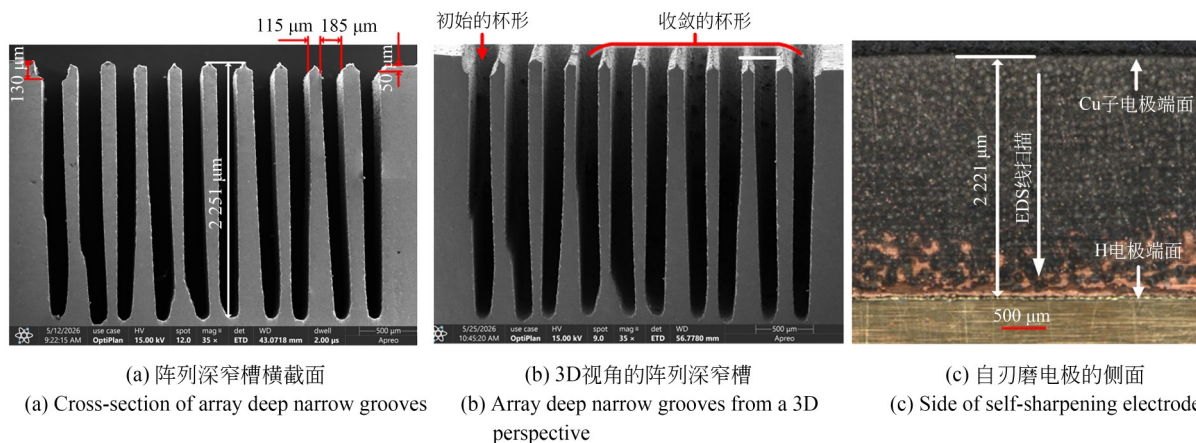
4.4 阵列深窄槽的加工

从4.1~4.3节的研究结果可以发现,槽宽的控制是关键,槽宽=2×单边加工间隙+Cu子电极厚度,通常单边加工间隙大约为20~50 μm,因此加工间隙是决定槽宽的主要因素,在负极性加工的情况下加工间隙主要取决于开路电压和脉冲频率,通过减小Cu子电极厚度来减小槽宽的实际作用有限,反而会显著增加Cu子电极长度

损耗。

最终确定使用H70Cu100H70复合材料电极,设置开路电压120 V和脉冲频率10 000 Hz,作为负极性电火花成形加工300 μm间隔深窄槽的工艺参数。将进给深度增加到3.8 mm,加工结果如图9所示。

图9(a)为深窄槽的横截面,加工的槽深为2 251 μm,深宽比12,加工过程为排出深窄槽中的碎屑,需要喷液,导致自刃磨露出的Cu100子电极存在微幅振动,其优点是改善排屑,没有因为加工深度的增加而降低材料去除率,但也导致平均槽宽为185 μm、壁宽为115 μm,槽宽明显大于壁宽,平均单边加工间隙为43 μm。大损耗加工需要将复合材料电极装夹露出较长,喷液导致的微幅振动使得前几轮次加工的深窄槽下部存在不规则区域,但这些不规则区域并不影响阵列深窄槽的实用性能。随着复合材料电极损耗变短,后续轮次加工的深窄槽较为规则。Cu100子电



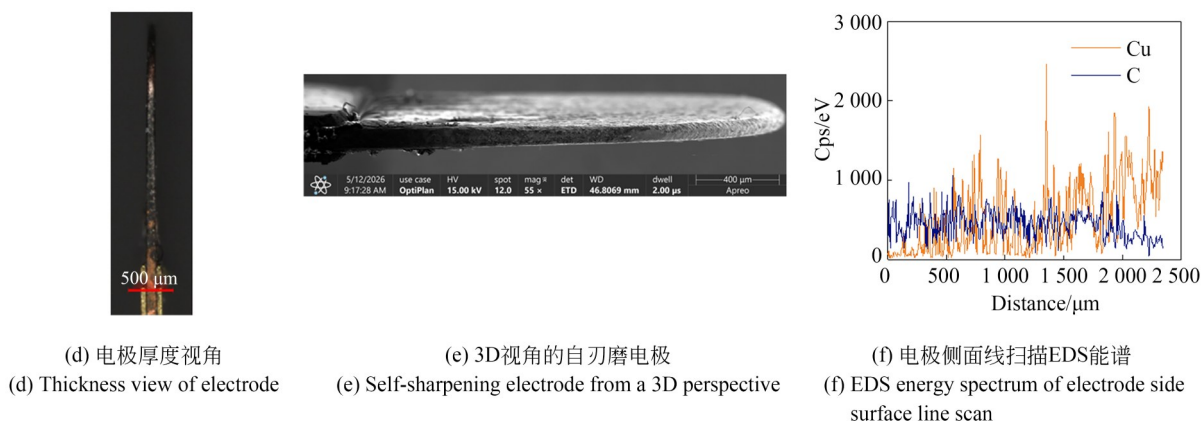


图9 深窄槽的电火花加工

Fig. 9 EDM of deep narrow grooves

极平均每轮次长度损耗 $1\,158\,\mu\text{m}$ 。首轮次加工的顶部杯形高度为 $130\,\mu\text{m}$,后续轮次的杯形迅速减小并且收敛为微细结构,第10轮次杯形高度 $50\,\mu\text{m}$ 。

图9(b)为用电火花线切割切开后的三维视角照片。10个轮次加工后自刃磨露出的Cu100子电极长度为 $2\,221\,\mu\text{m}$ (图9(c)),并且保持良好的平直状态(图9(d)~9(e))。对自刃磨露出的Cu100子电极侧面进行了EDS线扫描测试,结果表明(图9(f)):在接近H子电极端面的附近,Cu的成分很高,说明表面C成分偏弱,遮蔽Cu子电极的能力较差,随着与H子电极端面的距离越来越远,Cu成分逐渐下降,然后稳定下来,说明表面C成分遮蔽能力增加,正好补偿了与H子电极端面的距离越远,参与加工时间越长、导致厚度损耗越大的问题,因此Cu子电极厚度较均匀。

图10是深窄槽加工过程中从示波器采集的10个周期的典型放电波形。开路状态下平均电压为 $60\,\text{V}$ (图10(a))。稀疏放电时平均电压在 $57\,\text{V}$ 小范围波动,放电维持电压为 $16\sim 18\,\text{V}$,此时伺服系统控制电极前进(图10(b))。剧烈放电时平均电压在 $44\,\text{V}$ 波动,但波动范围相对较大,放电维持电压仍保持 $16\sim 18\,\text{V}$,此时伺服系统控制电极在原位抬刀循环加工(图10(c))。出现短路时平均电压较低,但波动范围更大,意味着有时平均电压较高时也伴随瞬间短路,恢复放电后,放电维持电压又回到 $16\sim 18\,\text{V}$,但往

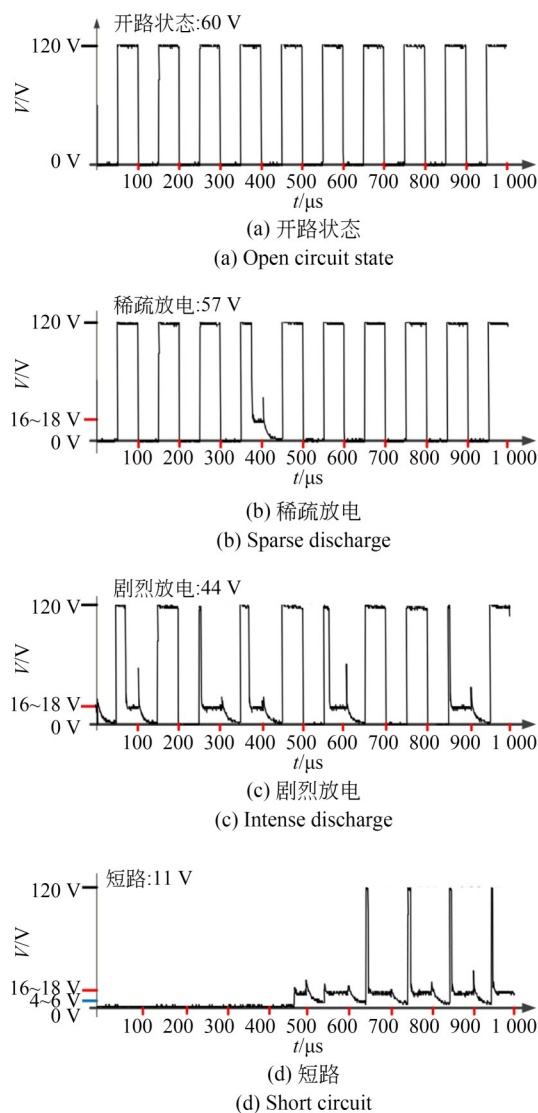


图10 放电波形

Fig. 10 Discharge waveform

往前几个周期波形的脉间最低电压 4~6 V, 不能立即消电离, 此时有时伴随拉弧, 加大了电极损耗, 伺服系统应控制电极回退(图 10(d))。

硬质合金是粉末冶金制品, 材料的均匀性较差, 存在不少导电性能较低的显微障碍质点, 这些质点造成短路和拉弧, 是工具电极加工损耗大的主要成因。因此加工过程难以均匀推进, 电极前进遇到障碍质点发生短路或拉弧时, 伺服系统控制电极回退、再前进, 循环拉锯, 克服障碍质点后均匀推进一段距离, 又遇新的障碍质点, 再次反复拉锯。图 11 是 Cu 和 W 两种低损耗率子电极克服障碍质点的过程比较分析, Cu 子电极遇到障碍质点时, 由于损耗率较大, 在较快损耗的同时将障碍质点周边的工件材料较快蚀除, 从而对障碍质点形成三面包围之势, 能够更快克服障碍质点(图 11(a))。与之相比, 使用 W 子电极时虽然损耗较小, 但克服障碍质点的拉锯过程长得多。因此 Cu 子电极虽然损耗较大, 但加工过程相对平稳得多, 这正是本研究使用 Cu 作为复合材料电极的低损耗率子电极进行大损耗加工硬质合金的优势。

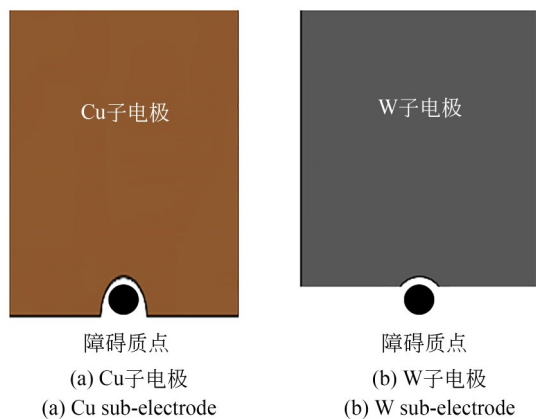


图 11 克服障碍质点

Fig. 11 Overcoming of barrier particles

4.5 自刃磨的仿真分析

依据复合材料电极电火花成形加工定理^[15]: 当批量电火花成形加工轮次 $i \rightarrow \infty$ 时, 复合材料电极的所有子电极的长度损耗 $\Delta L_{i,j}$ 均等于 m 子电极(即复合材料电极中损耗率最小的子电极)的长度损耗 $\Delta L_{i,m}$, 子电极长度差 $\Delta D_{i,j}$ 恒定, 即:

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \Delta L_{i,j} = \Delta L_{i,m} = C_L(m), \quad (1)$$

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \Delta D_{i,j} = C_D(j), \quad (2)$$

其中: j 为与 m 子电极配合的任意子电极, $C_L(m)$ 和 $C_D(j)$ 分别为仅与 m 和 j 子电极相关的常量。

如图 12 所示, 以第 i 轮加工结束时的主要几何参数为基础进行建模。自刃磨复合材料电极包括: 一片 Cu 子电极和两片 H 子电极, 显然 Cu 子电极为 m 子电极。Cu 子电极在成形加工过程中逐渐露出。 D 为复合材料电极整体每轮次的进给深度, $L_{i,m}$ 和 $L_{i,H}$ 分别为第 i 轮加工结束时的 m 子电极和 H 子电极长度, $\Delta L_{i,m}$ 和 $\Delta L_{i,H}$ 分别为第 i 轮加工结束时的 m 子电极和 H 子电极的长度损耗, 因此有:

$$\Delta L_{i,m} = L_{i-1,m} - L_{i,m}, \quad (3)$$

$$\Delta L_{i,H} = L_{i-1,H} - L_{i,H}. \quad (4)$$

除首轮次加工之外, 仅 m 子电极参与进给深度 D 的全程加工, 而 H 子电极包含空走和加工两部分。 $\Delta D_{i,H}$ 为第 i 轮次加工结束时的子电极长度差, 也就是 Cu 子电极自刃磨长度。

$$\Delta D_{i,H} = L_{i,m} - L_{i,H}, \quad (5)$$

$$D_{i,H} = D - \Delta L_{i,m} - \Delta D_{i,H}. \quad (6)$$

以复合材料电极工作面叠加加工间隙 δ , 又得到工件窄槽结构轮廓(蓝色), 且 $\Delta D_{i,H} = \Delta d_{i,H}$, 而通过观测每个加工轮次的工件微结构横截面可以获得 $\Delta d_{i,H}$, 另外最后轮次的 $\Delta D_{i,H}$ 也可以直接观测。第 i 轮加工结束时的顶部杯形高度:

$$\Delta h_{i,H} = D_{i,H} + \delta = D - \Delta L_{i,m} - \Delta D_{i,H} + \delta. \quad (7)$$

依据复合材料电火花成形加工定理关于子

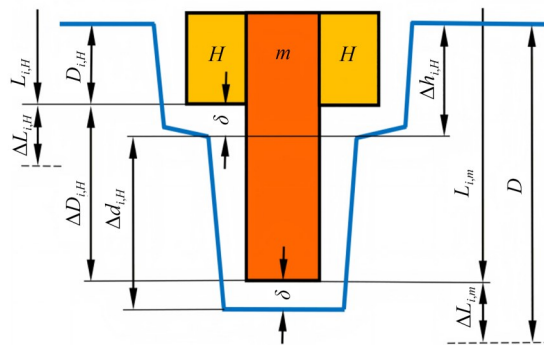


图 12 自刃磨复合材料电极的仿真模型

Fig. 12 Simulation model of self-sharpening CME

电极损耗率的定义, j 子电极损耗率 $T_j = \Delta L_{i,j} / (D_{i,j} + \Delta L_{i,j})$, 即 T_j 为 j 子电极长度损耗 $\Delta L_{i,j}$ 与其加工进给深度 $D_{i,j} + \Delta L_{i,j}$ 之比, 这里 j 子电极为 m 子电极或 H 子电极。迭代运算时, 令 $\epsilon_{i,H} = \Delta D_{i,H} - \Delta D_{i-1,H}$, ϵ 为收敛条件, 当 $\epsilon_{i,H} \leq \epsilon$ 时判定收敛。

Cu 子电极参与每轮次全程加工, 加工系统自动对刀获得每轮次的 Cu 子电极长度损耗。除首轮次外, H 子电极不参加全程加工, 难以直接测量每轮次长度变化, 需要依据公式(3)~公式(7)进行迭代运算, 将 $\Delta D_{n_{H70}, H}$ 运算值与观测值进行对比, 直到两者相吻合时获得 H 子电极损耗率 T_H , 同时获得收敛轮次 $n_H = i$ 。

首先以 4.1 节图 3c 作为仿真迭代运算实例, 进给深度 $D = 1 \text{ mm}$, 复合材料电极初始长度 $L_{0,m} = L_{0,H} = 20 \text{ mm}$ 。设置收敛条件 $\epsilon = 1 \mu\text{m}$, 依据图 3c 窄槽测量数据, 单边加工间隙 $\delta = 25 \mu\text{m}$, 每轮次 Cu100 子电极长度损耗 $\Delta L_{i,m} = 410 \mu\text{m}$, 因此 m 子电极损耗率 $T_m = T_{\text{Cu100}} = \Delta L_{i,m} / D = 41\%$, 第 10 轮次之后 Cu100 子电极自刃磨长度为 $573 \mu\text{m}$ 。当取 $T_{H70} = 96\%$ 进行试算时, 依据公式(3)~公式(6)的仿真迭代运算结果见图 13, H70 子电极收敛轮次 $n_{H70} = 3$, $\Delta D_{n_{H70}, H70} = 573 \mu\text{m}$, 恰好与测量值相等。由图可知, 初期轮次 $\Delta D_{i,H70}$ 变化显著, 随着加工轮次增加, $\Delta D_{i,H70}$ 变化越来越小, 最后收敛于 $\Delta D_{n_{H70}, H70}$ 。将上述数据代入式(7)计算收敛时顶部杯形高度 $\Delta h_{n_{H70}, H70} = 42 \mu\text{m}$, 很小, 与图 3(c)的情况相吻合。此外, 第 1 轮次 H70 参与全程加工, 故尚未收敛的第 1 轮次 Cu100 子电极自刃磨长度 $\Delta D_{1,H70} = T_{H70} D - \Delta L_{1,m} = 550 \mu\text{m}$, 依据公式(7)计算第 1 轮次顶部杯形高度 $\Delta h_{1,H70} = 61 \mu\text{m}$, 也非常小, 虽然与图 3(c)首轮次杯形高度接近于 0 相比, 存在一定偏差, 但至少说明图 3(c)工况获得的顶部杯形必然非常微细。

接下来以 4.4 节深窄槽加工作为仿真迭代运算实例, 仅改变进给深度 $D = 3.8 \text{ mm}$, 其余输入参数不变, 仿真迭代运算结果也见图 13。H70 子电极收敛轮次 $n_{H70} = 4$, $\Delta D_{n_{H70}, H70} = 2177 \mu\text{m}$, 与第 10 轮次之后 Cu100 子电极自刃磨长度测量值 $2221 \mu\text{m}$ 仅相差 $44 \mu\text{m}$ 。计算收敛时顶部杯形高

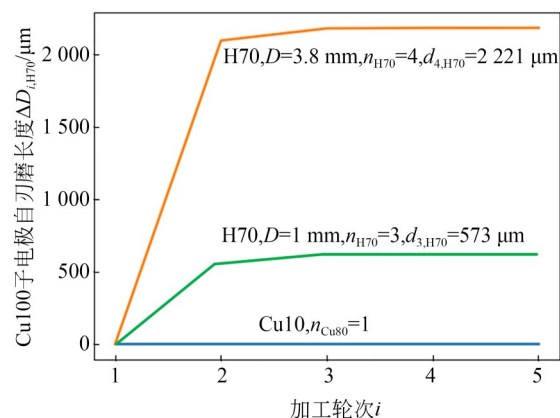


图 13 阵列深窄槽的仿真加工

Fig. 13 Simulation machining of array deep narrow grooves

度 $\Delta h_{n_{H70}, H70} = 64 \mu\text{m}$, 与测量值仅相差 $14 \mu\text{m}$ 。计算第 1 轮次顶部杯形高度 $\Delta h_{1,H70} = 195 \mu\text{m}$, 与测量值相差 $50 \mu\text{m}$ 。分析表明进给深度 D 由 1 mm 增加至 3.8 mm 以加工深窄槽时, 子电极 Cu100 和 H70 的损耗率会发生一定变化, 由此带来少许计算误差。

综上所述, 实验与仿真迭代计算均表明, 大损耗加工普通阵列窄槽, 顶部杯形十分微细, 对加工结果几乎没有影响。当加工大深度阵列窄槽时, 杯形也仅对首轮次加工有轻微影响, 但随即在后续加工中快速收敛于微细结构。

5 结 论

复合材料电极能够制作得足够长, 中间 Cu 子电极由外侧两片 H 子电极夹持保护, 且具备足够结构强度。复合材料电极成形加工同时自刃磨, 且仅刃磨必要长度, 可避免 Cu 子电极露出过长、发生变形甚至损坏。为加工密集的阵列深窄槽, 以实现槽宽和壁宽尽可能接近为首要目标, 研究开路电压、脉冲频率和 Cu 箔子电极厚度的影响。结果表明: 设置开路电压为 120 V 、脉冲频率为 $10\,000 \text{ Hz}$, 负极性加工 $300 \mu\text{m}$ 间隔阵列窄槽时, H50Cu100H50 复合材料电极加工的综合表现最好。据此加工了深度大于 2.2 mm 、深宽比 12 的阵列深窄槽。负极性加工在自刃磨露出

的 Cu 子电极侧面会沉积抗损耗 C 成分,其遮蔽 Cu 子电极能力距离 H 子电极端面越远就越强,恰好补偿了距离 H 子电极端面越远的侧面参与放电加工时间越长、厚度损耗越大的问题,使得 Cu 子电极厚度较为均匀。进给深度在 1 mm 以下时,复合材料电极成形加工基本不会在硬质合金窄槽顶部形成杯形。仅在大进给深度加工时,高损耗率的 H 子电极会在首轮次加工的窄槽顶部形成杯形,但随着加工轮次的增加,杯形高度

快速消减,最终收敛于稳定的微细形状,对阵列深窄槽的影响轻微。

作者贡献声明:

伍 博:实验及数据分析,论文撰写;

雷建国:论文构思与数据分析;

陆建勋:实验加工;

徐 斌、程 涛:样品检测;

伍晓宇:论文审核。

参考文献:

- [1] 汤勇,周明,韩志武,等. 表面功能结构制造研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(23): 93-105.
TANG Y, ZHOU M, HAN ZH W, *et al.* Recent research on manufacturing technologies of functional surface structure [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(23): 93-105. (in Chinese)
- [2] ZHANG G Q, MA Y T, LUO T, *et al.* Fabrication of hierarchical micro-groove structures by vibration assisted end fly cutting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 322: 118164.
- [3] ZHANG Y W, ZHANG Q L, ZHAO J, *et al.* Ultrasonic vibration assisted milling of titanium alloy microchannel [J]. *Precision Engineering*, 2024, 88: 251-265.
- [4] WANG H J, TIAN L L, ZHENG J, *et al.* The synergetic effects of laser texturing and super-hydrophobic coatings on improving wear properties of steel [J]. *Tribology International*, 2022, 173: 107657.
- [5] MA J W, ZHANG H, YE T, *et al.* New method of continuous-wave laser ablation for processing microgroove with variable cross-section[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 170: 110292.
- [6] LI J F, SU G K, CHEN X L, *et al.* Study of electrical discharge machining of narrow grooves with foil tool electrode[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 128 (11): 5405-5423.
- [7] SHIBAYAMA T, KUNIEDA M. Diffusion bonded EDM electrode with micro holes for jetting dielectric liquid[J]. *CIRP Annals*, 2006, 55(1): 171-174.
- [8] SHIBAYAMA T, KUNIEDA M. Diffusion-bonded tool electrode for electrical discharge machining with microchannels for jetting dielectric liquid [J]. *Journal of the Japan Society of Electrical Machining Engineers*, 2010, 44(105): 12-16.
- [9] XU B, WU X Y, LEI J G, *et al.* Laminated fabrication of 3D micro-electrode based on WEDM and thermal diffusion welding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 221: 56-65.
- [10] LEI J G, WU X Y, XU B, *et al.* Laminated fitting fabrication of Cu-Sn composite 3D microelectrodes and elimination of ridges on the machined surface of 3D micro-cavities[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225: 24-31.
- [11] LEI J G, WU X Y, WANG Z L, *et al.* Electrical discharge machining of micro grooves using laminated disc electrodes made of Cu and Sn foils[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 271: 455-462.
- [12] LEI J G, WU X Y, ZHOU Z W, *et al.* Sustainable mass production of blind multi-microgrooves by EDM with a long-laminated electrode[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123492.
- [13] TANG H, TANG Y, WU X Y, *et al.* Fabrication and capillary characterization of multi-scale microgroove wicks for ultrathin phase-change heat transfer devices [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 219: 119621.
- [14] WU B, WU H Y, LEI J G, *et al.* Experimental study on electrode wear during the EDM of microgrooves with laminated electrodes consisting of various material foils [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 29: 4191-4199.
- [15] WU B, LEI J G, LU J X, *et al.* Exploration of morphological evolution of surface array microstructures in die-sinking micro-EDM with composite material electrodes[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2026, 42: 75-90.
- [16] MARADIA U, BOCCADORO M, STIRNI-

- MANN J, *et al.* Electrode wear protection mechanism in meso-micro-EDM[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 223: 22-33.
- [17] KUNIEDA M, KOBAYASHI T. Clarifying mechanism of determining tool electrode wear ratio in EDM using spectroscopic measurement of vapor density[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1/2/3): 284-288.
- [18] WANG K, ZHANG Q H, ZHANG J H. Evaluation of scale effect of micro electrical discharge machining system[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 38: 174-178.

作者简介:



伍 博(1992—),男,江西余干人,博士,2015年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2022年于香港理工大学获得博士学位,主要从事载运工具精密构件高效制造领域的研究。E-mail: wu-bo@sztu. edu. cn

通讯作者:



雷建国(1985—),男,四川渠县人,博士,副教授,硕士生导师,2012年、2016年于深圳大学分别获得硕士和博士学位,主要从事微细加工技术与理论等方面的研究。E-mail: leijg@szu. edu. cn