

# 冲液方式对短电弧-电化学反应复合加工性能的影响研究\*

付 斐 代向宇 胡国玉 王家豪 周建平  
(新疆大学智能制造现代产业学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘 要:** 针对短电弧-电化学反应复合加工时内-外冲液方式存在的加工不稳定及加工效率低等问题, 提出了一种更适用于短电弧-电化学反应复合加工的外气-内液冲液方式。在加工过程中通过侧面冲入高压空气, 实现加工间隙内短电弧加工与电化学反应相结合的同时, 改善了间隙流场分布, 提高了短电弧-电化学反应复合加工效率及工件表面质量。基于 **Fluent** 软件进行内-外冲液及外气-内液冲液方式的流场仿真, 分析了侧面高压气体的冲入对间隙流场分布状态及介质电导率的影响。通过对比实验研究了两种冲液形式下的材料去除率、单位能耗体积比以及表面热损伤层。结果表明, 外气-内液冲液方式下的材料去除率 (**MRR**) 可以达到  $750 \text{ mm}^3/\text{min}$ , 相对于内-外冲液方式提高了 1.9 倍, 单位能耗体积比仅有  $149.98 \text{ kJ}/\text{cm}^3$ , 加工后工件表面无重铸层, 尺寸精度也得到了较大改善, 实现了材料的无重铸层加工。

**关键词:** 短电弧-电化学反应复合加工; 冲液方式; 流场分布; 材料去除率 (**MRR**); 表面质量

中图分类号: **TG661** 文献标识码: **A**

**DOI:** [10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.07.022](https://doi.org/10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.07.022)

## Effect of flushing mode on the performance of short electric arc and electrochemical compound machining

FU Fei, DAI Xiangyu, HU Guoyu, WANG Jiahao, ZHOU Jianping

(Modern Industrial College of Intelligent Manufacturing, Xinjiang University, Urumqi 830047, CHN)

**Abstract:** In order to solve the problems of unstable machining and low machining efficiency in the internal-external flushing mode of short electric arc and electrochemical compound machining, this paper proposes an external air-internal liquid flushing mode that is more suitable for short electric arc and electrochemical compound machining. In the machining process, high pressure air is injected into the side to realize the combination of short arc machining and electrochemical machining in the machining gap, improve the gap flow field distribution, and improve the efficiency of short electric arc and electrochemical compound machining and workpiece surface quality. Based on **Fluent** software, the flow field simulations of internal-external flushing and external air-internal liquid flushing were carried out to analyze the effect of flushing of side high-pressure gas on the flow field distribution of the gap and the electrical conductivity of the medium. The material removal rate, unit energy consumption volume ratio and surface thermal damage layer under the two flushing forms were investigated by comparative experiments. The results show that the material removal rate (**MRR**) of the external air-internal liquid flushing mode can reach  $750 \text{ mm}^3/\text{min}$ , which is 1.9 times higher than that of the internal-external flushing mode, and the unit energy consumption volume ratio is only  $149.98 \text{ kJ}/\text{cm}^3$ , and the surface of the workpiece is free of recast layer after machining, and the dimensional accuracy is also greatly improved, realizing the machining of material without recast layer.

**Keywords:** short electric arc and electrochemical compound machining; flushing mode; flow field distribution; material removal rate (**MRR**); surface quality

\* 国家自然科学基金项目“短电弧-电化学反应作用机理及无重铸层高效加工方法研究”(52265060)

短电弧加工作为一种非接触放电加工技术，具有极高放电能量和加工效率，广泛用于超硬、高强度、高韧性难切削材料的结构及零部件的加工中<sup>[1-4]</sup>。短电弧加工是在气液两相混合工作介质作用下利用高能束电弧熔融材料，其间隙内熔融材料在介质冲洗下急速冷却易沉积在工件表面形成重铸层<sup>[5-7]</sup>，同时放电蚀除材料过程中，间隙内产生的蚀除颗粒及气泡会改变放电环境，降低放电加工过程的稳定性<sup>[8-9]</sup>。目前，短电弧加工的冲液方式主要以内外组合冲液方式为主，存在放电环境差、加工效率低及工件表面质量差等问题。为了改善间隙内的流场分布及放电环境，可以通过不同组合冲液方式来提高介质的冲洗能力，将蚀除颗粒及气泡冲离放电间隙降低短路及二次放电的概率。因此，冲液方式对短电弧及短电弧-电化学复合加工效率及表面质量有重要的影响。

国内外学者针对不同冲液条件下间隙流场对放电加工性能的影响进行了相关研究，李磊等人<sup>[10]</sup>使用集束电极作为工具电极，并建立间隙流场模型，对多孔冲洗间隙流场的速度大小及蚀除产物的浓度分布进行仿真模拟，证明集束电极多孔冲洗具备更强的冲洗能力，改善了极间放电环境，在提高材料去除率的同时也可以获得较低的电极损耗率。张彦等人<sup>[11]</sup>使用管状电极进行内部和侧面介质冲洗，结合电火花加工和电化学加工工艺，提高了孔的表面质量并削弱了重铸层厚度。王志强等人<sup>[12]</sup>提出了使用高压管内介质及管外介质联合冲洗的方法，减少了蚀除产物的堆积，加快了放电间隙内电解液的更新，提高了加工效率及工件表面质量。Sing N K 等人<sup>[13]</sup>为了改善放电间隙内蚀除产物的堆积现象，使用气体辅助多孔旋转刀具进行放电加工，有效解决了蚀除产物的堆积现象，提高了放电加工的加工效率。张晟晟等人<sup>[14]</sup>提出了结合短电弧加工和电化学加工的新型组合加工方法，利用电解质和空气混合介质的双流体特性改善间隙流场分布和放电状态，通过流场仿真和实验验证了双特性工作介质对加工性能的影响，工件表面完整性得到了显著改善。上述研究表明使用不同组合冲液方式不仅可以提高介质冲洗能力，改善间隙放电环境，对放电加工性能也有重要影响。

本文基于传统的短电弧放电加工内-外冲液方式提出了更适用短电弧-电化学复合加工的外气-内液冲液方式，通过仿真分析了不同冲液方式下的间

隙流场速度、湍流动能以及电导率的影响规律。利用空气和 NaCl 盐溶液作为工作介质，研究两种冲液方式下的材料去除率、单位能耗体积比以及表面热损伤层，验证了外气-内液冲液方式在加工效率、表面质量和尺寸精度方面有较大改善，为研究短电弧-电化学复合加工性能提供了理论依据。

## 1 不同冲液方式间隙流场仿真及分析

### 1.1 间隙流场物理模型

短电弧-电化学复合加工内-外冲液方式的简化示意图如图 1 所示，管状工具电极与工件之间产生的高能束电弧使工件材料熔化及汽化，并在介质冲洗下抛离工件表面，电解液通过电极中心孔冲入工作间隙，短电弧铣削加工的同时进行电化学加工蚀除重铸层。为了改善间隙内的放电环境及流场分布，使用外气-内液组合冲液方式，提高工作介质的介电能力及冲洗能力，达到提高加工效率及工件表面质量的目的，根据短电弧-电化学复合加工示意图建立三维流场模型如图 2 所示，基于 Fluent 软件对图 2 所示的流场模型根据实验数据进行边界条件的设置，入口设置为流量入口，管状电极内部流体域壁面设置为移动壁面，旋转速度为 20 rad/s，出口设置为出流边界。

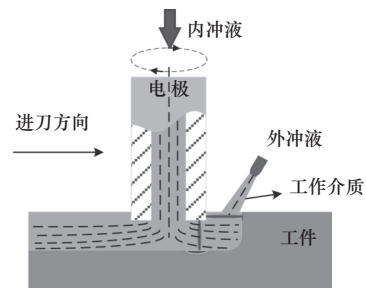


图 1 短电弧-电化学复合加工内-外冲液方式示意图

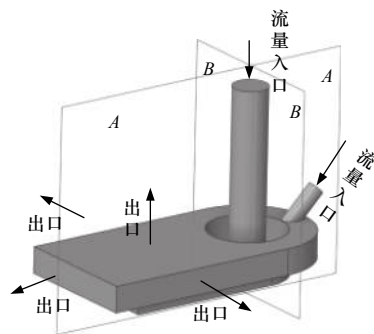


图 2 短电弧-电化学复合加工流场几何模型

### 1.2 间隙流场理论模型

考虑到短电弧-电化学复合加工过程的液体介

质和压缩空气涉及气液两相流，采用VOF多相流模型，在压缩空气和液体介质开始冲洗前，流域内充满空气，假设流体为连续介质，其运动符合质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

式中： $\rho$ 为密度， $\text{kg/m}^3$ ； $\mathbf{v}$ 为混合介质的速度矢量， $\text{m/s}$ 。

粘性流体的运动过程也需要遵循动量守恒方程：

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2)$$

式中： $p$ 为压力， $\text{Pa}$ ； $\mu$ 为动态粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； $\mathbf{g}$ 为重力加速度， $\text{m/s}^2$ 。

$Re > 8000$ 时，间隙工作液的流动状态为湍流，湍流模型采用射流和两相流常用的Realizable模型，并在数值模型中加入了势方程，用来求解间隙流场中的电导率分布：

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) + S = 0 \quad (3)$$

式中： $\varphi$ 为电势， $\text{V}$ ； $\sigma$ 为流体电导率， $\text{S/m}$ ； $S$ 为能源项。

假设模拟过程中阴极和阳极处不产生气体，从而忽略了温度对介质电导率的影响。为简化仿真计算过程，突出研究目标，对模型进行简化：（1）不考虑对流换热中能量的损失。（2）流体介质为不可压缩流体。表1为模拟过程中所需要的参数。

表1 仿真设置及参数大小

参数名称	数值
气体流量/(kg/s)	0/0.000 529 958 3
液体流量/(kg/s)	0.133 3
气体电导率/(S/m)	$1 \times 10^{-9}$
液体电导率/(S/m)	20
电极转速/(rad/s)	20

### 1.3 仿真结果及分析

图3比较了外气-内液和内-外冲液流场的速度云图以及相应的湍流动能云图，可以看出在侧面高压气体冲洗的作用下，外气-内液冲液方式底部间隙流场的最大湍流动能为 $40 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，相较于内-外冲液方式增加了10倍，这是因为高压气体在侧面间隙入口的截面减小，使得气体速度急剧增大并与管状电极内部冲出的液体在底面间隙混合，增大了流场内介质的波动。由于底部右侧间隙径向方向截面

面积逐渐增大，流体进入底部间隙后速度急剧减小形成较大的速度差，提高了介质流体的冲洗能力，因此有利于蚀产物的排出，降低蚀除产物堆积及二次放电的概率。并且在气体介质的冲入下，工作介质可以得到及时更新，有利于降低电解液对工件表面的杂散腐蚀。

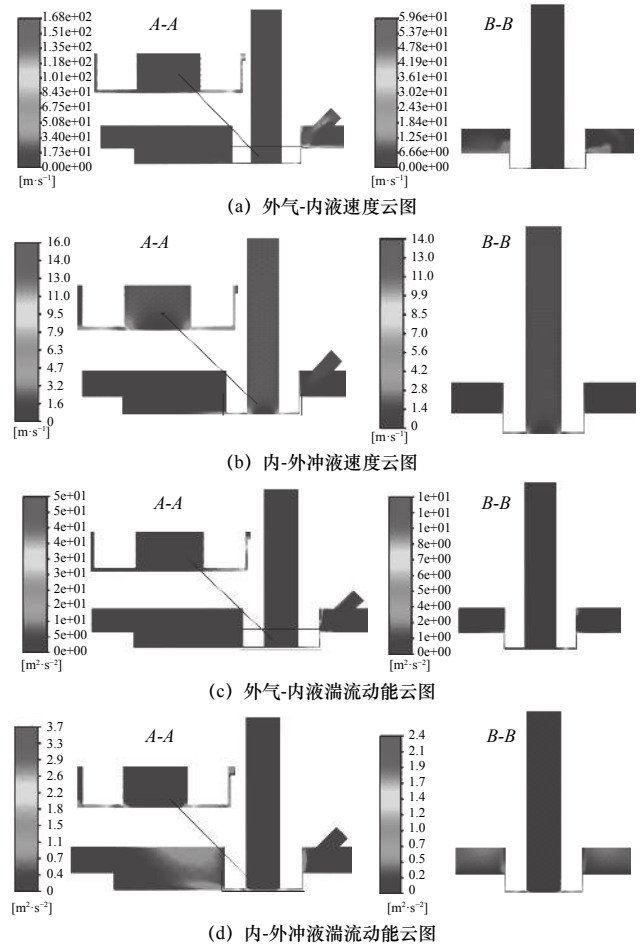


图3 流场速度及湍流动能云图

如图4所示，外气-内液与内-外冲液方式下流场底面左侧间隙的流速变化趋势相同，工作液通过电极中心孔冲入底部放电间隙，在经过仅有一个放电间隙宽度左右的出口通道时流速增加。在侧面高压空气的冲洗下，外气-内液流场底面右侧侧间隙流速急剧上升，最高速度达 $158 \text{ m/s}$ ，使得间隙流场剧烈波动，有利于蚀除颗粒更快冲出底部间隙。

图5为外气-内液流场混合介质的电导率变化云图，可以看出在侧面高压气体的冲洗下，右侧间隙以及底面间隙的右侧部分充满了空气，由于空气的介电强度较高，侧面间隙及底面间隙的前部分解质的电导率较低，加工方式主要以短电弧加工为主。

从截面电导率分布云图可以看出，气液两相在底面间隙的中心部分混合，增大了流场的湍流强度，底面间隙左侧部分以液相为主，电导率沿底面间隙左侧出口方向逐渐升高，为后续电化学削弱重铸层提供了条件。

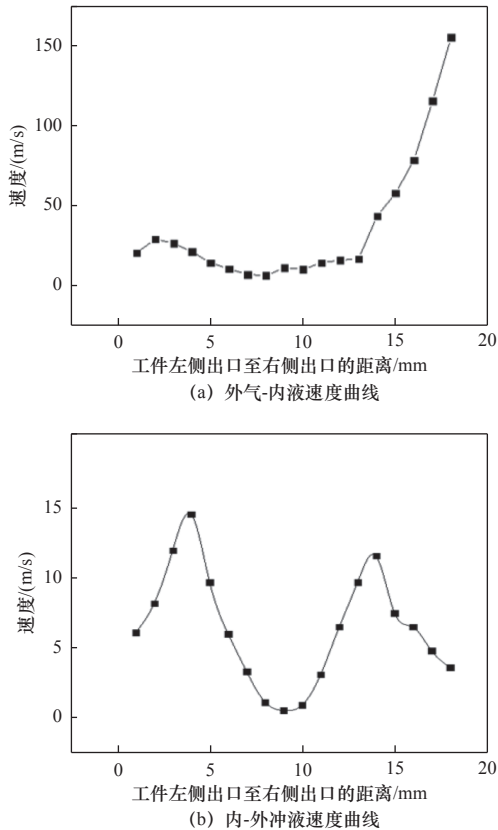


图4 流场底面速度对称轴线速度分布曲线

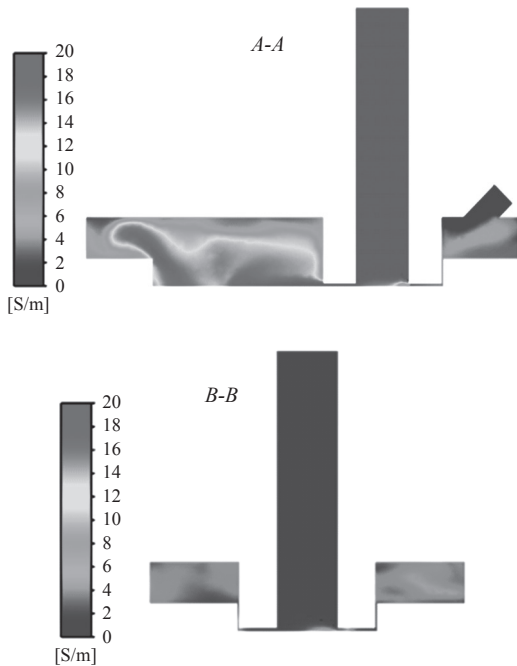


图5 流场电导率云图

## 2 实验装置

本文所进行的实验在专用的五轴短电弧数控加工机床上进行，整个加工基本装置如图6所示。试验选取尺寸为30 mm × 30 mm × 8 mm 钛合金 TC4 作为试验样件；工具电极选择外径为18 mm 内径为8 mm 的石墨管；压力气泵为加工提供一定流量的气体工作介质；液压泵为加工提供液体介质；精密天平用于测量加工前后工件的质量；其他加工参数如表2所示。

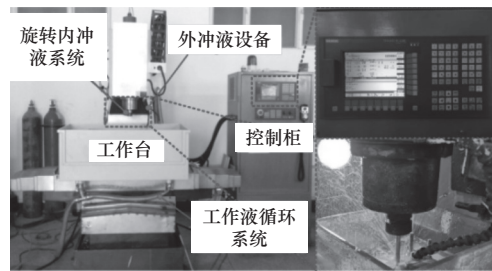


图6 短电弧铣削加工机床

表2 对比实验加工参数

加工参数	数值
工具电极极性	负极性
加工电压/V	25
气体流量/(L/min)	0/1.7
液体流量/(L/min)	8
NaCl 溶液浓度/(%)	10
进给速度/(mm/min)	8
电极旋转速度/(r/min)	1200
铣削深度/mm	4

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 不同冲液方式下极间电压和电流波形对比分析

两种冲液方式下的极间电压和电流波形如图7所示。由图可知，相较于内-外冲液全是电解液的加工方式，外气-内液加工方式的放电更为分散，单次电弧放电能量更小，对工件表面的损伤较小。由图7b和图7d可知，使用外气-内液的冲液方式，电弧更易断开，更易形成连续的单弧放电，连续电弧产生的很少，这样对工件表面的持续损伤削弱，电弧加工后工件表面质量相对于内-外冲液方式会更好，为后续底面电化学加工提供便利，更易实现材料的高效高质量加工。



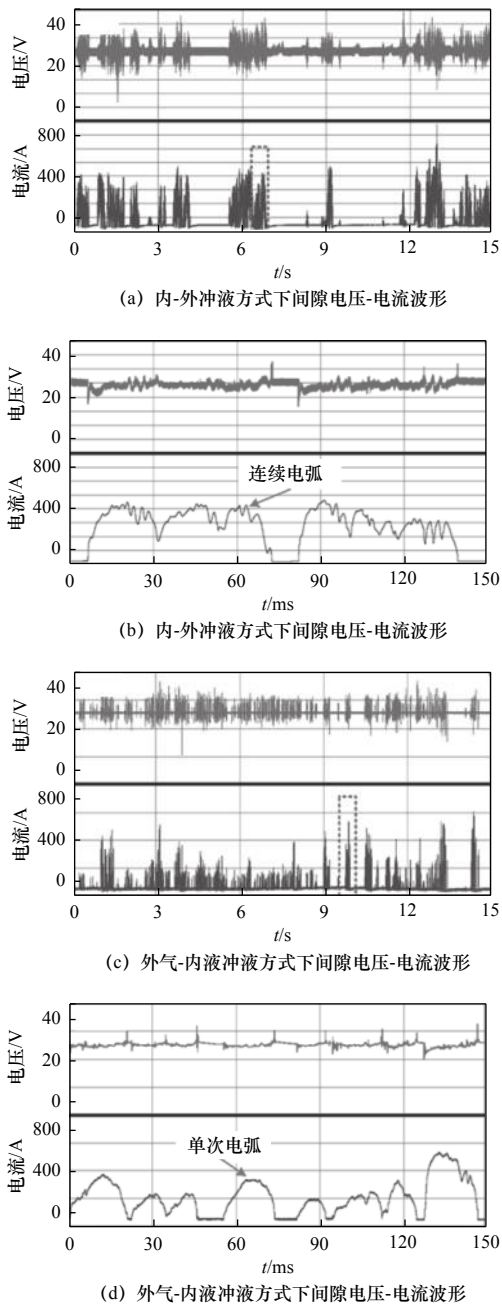


图7 不同冲液方式下间隙电压-电流波形

### 3.2 不同冲液方式下材料去除率分析

不同冲液方式下的材料去除率如图8所示,采用外气-内液的冲液方式进行加工,实现无重铸层加工时的加工效率可以达到  $750 \text{ mm}^3/\text{min}$ ,而使用内外电解液的方式进行加工时的材料去除率仅有  $394 \text{ mm}^3/\text{min}$ ,提高了1.9倍。这主要是因为使用外气-内液冲液方式加工时,由于电弧加工阶段采用的是气体介质,相对于使用液体介质,加工后工件表面损伤层更薄,这使得底面电化学作用更短的时间就可以完全去除表面损伤层。再加上使用气体介质时,电弧加工后的过切量更小,这使得底面两电

极之间的距离更近,更有利于电化学加工的进行,所以无重铸层加工时的加工效率得到了很大的提高。

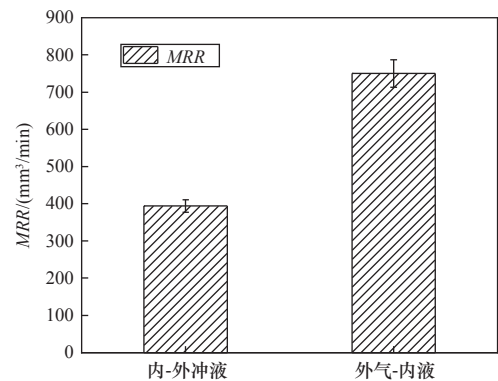


图8 不同冲液形式材料去除率对比

### 3.3 不同冲液方式下单位能耗体积比分析

不同冲液方式下的单位能耗体积比如图9所示,采用外气-内液的冲液方式进行加工,实现无重铸层加工时的单位能耗体积比仅有  $149.98 \text{ kJ}/\text{cm}^3$ ,而使用内外电解液的方式进行加工时的单位能耗体积比为  $336.95 \text{ kJ}/\text{cm}^3$ ,增加了将近2.3倍。这主要是因为使用外气-内液冲液方式加工时,由于电弧加工阶段采用的是气体介质,相对于使用液体介质,加工后工件表面损伤层更薄,这使得底面电化学作用更短的时间就可以完全去除表面损伤层,因此运用在电化学加工上的能量相对减少,使得能耗降低。再加上使用气体介质时,工件侧面过腐蚀较少,在外部气体的作用下内冲液体基本被压缩到底面间隙,使得无需更多的能量用于侧面的去除,减少了能量的浪费。

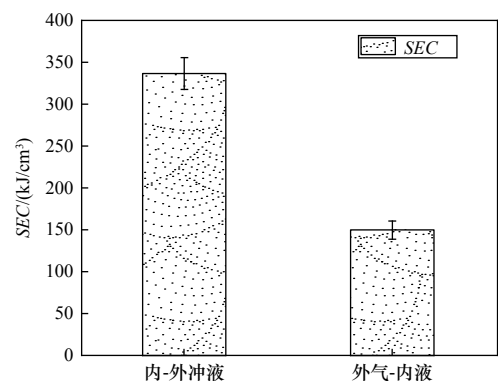


图9 不同冲液形式单位能耗体积比对比

### 3.4 不同冲液方式下表面热损伤层分析

相同进给速度  $8 \text{ mm}/\text{min}$  下两种加工方式加工后工件的截面面貌如图10所示。由图可知,使用

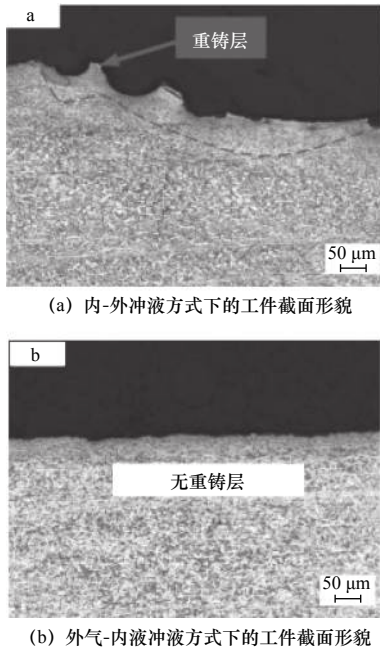


图 10 不同冲液方式加工截面形貌对比

外气-内液冲液方式加工后工件表面无重铸层，实现了材料的无损伤加工。而使用内-外冲液方式加工后的截面由于电弧加工后对工件表面的损伤较大，导致在相同的电化学加工时间内无法达到热损伤层的完全去除，影响了无热损伤层加工时的加工效率。

### 3.5 不同冲液方式下加工轮廓尺寸精度及表面质量分析

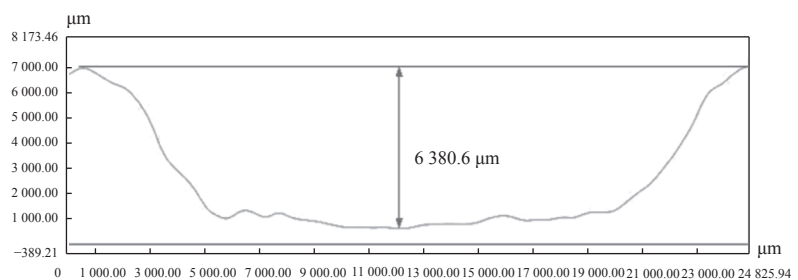
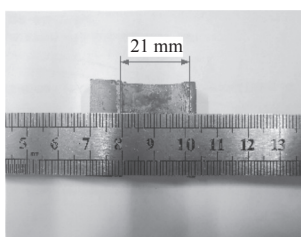
不同冲液方式下实现无损伤层加工时加工件轮廓尺寸精度如图 11 所示。加工时使用的是外径

18 mm 的电极，加工深度为 4 mm。由图可知，使用外气-内冲液方式加工时，加工后的尺寸精度更好。此时加工宽度为 20 mm，加工深度为 5 638.4 μm，表面粗糙度 Sa 仅有 5.147 μm。相比于使用内-外冲液方式的加工宽度 21 mm，加工深度 6 380.6 μm，表面粗糙度 Sa 为 11.512 μm，Sa 降低了约 55.3%，尺寸精度及表面质量得到了很大提高。这主要是由于使用外气-内液冲液方式加工时，电弧加工阶段进行的是气体介质加工，对工件表面的损伤层厚度较薄，因此实现无热损伤层加工后的加工精度更高。

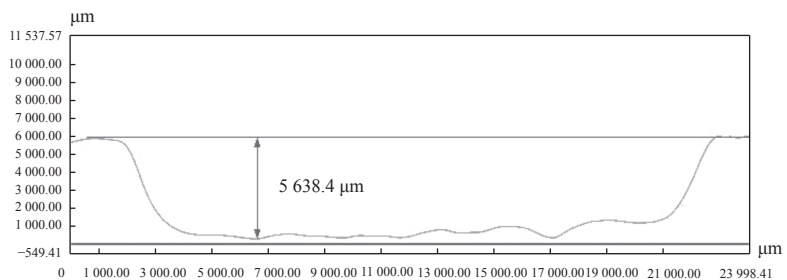
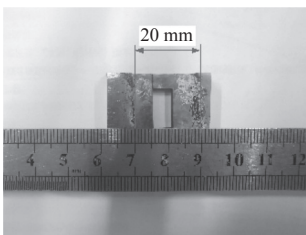
## 4 结语

通过仿真对比外气-内液和内-外冲液方式下的间隙流场状态，说明了侧面高压气体的冲入对间隙流场及介质电导率分布的影响。并通过实验对比了外气-内液与内-外冲液方式下的加工性能，主要包括材料去除率、单位能耗体积比、表面热损伤层厚度以及尺寸精度。主要结论如下：

(1) 对间隙流场的仿真结果表明，外气-内液冲液方式侧面高压气体的冲入使间隙流场内产生剧烈的波动，底部间隙流场的最大湍流动能为 40 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>，相比于内-外冲液方式下的湍流动能增大了 10 倍，并且增大了介质流速，产生了较大的速度梯度，有利于介质在间隙内的流动，加速蚀除产物的排出和电解液的更新。此外，空气介质的冲入



(a) 内-外液冲液方式工件轮廓尺寸精度



(b) 外气-内液冲液方式工件轮廓尺寸精度

图 11 不同冲液方式加工轮廓尺寸精度对比

降低了介质的电导率,使放电加工后工件表面重铸层更薄,有利于后续电化学加工蚀除重铸层。

(2) 实验结果表明,内-外冲液方式下的加工效率  $354 \text{ mm}^3/\text{min}$ ,单位能耗体积比  $336.95 \text{ kJ}/\text{cm}^3$ ;外气-内液方式下的材料去除率 ( $MRR$ ) 可以达到  $750 \text{ mm}^3/\text{min}$ ,单位能耗体积比为  $149.98 \text{ kJ}/\text{cm}^3$ ,相对于内-外冲液方式的材料去除率 ( $MRR$ ) 提高了 1.9 倍,单位能耗体积比为原来的 44.5%。

(3) 侧面高压空气的冲入不仅改善了间隙流场内介质的流动特性,也提高了介质的介电能力,与内-外冲液加工方式相比,外气-内液冲液方式提高了工件轮廓尺寸精度及表面质量,实现了材料无重铸层加工。

### 参 考 文 献

- [1] 陈小康. 短电弧高效铣削加工机理及工艺研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021.
- [2] Li X Z, Zhou J P, Xu Y, et al. Experimental study in SEAM machining performance of W-Cu alloy electrode materials[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(9): 2977-2989.
- [3] Li X Z, Zhou J P, Wang K D, et al. Experimental research on machinability of different electrode materials for SEAM of the nickel-based superalloy GH4169[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2018, 232(24): 4528-4537.
- [4] Zhou Z J, Zhou J P, Liu K, et al. Experimental study on short electric arc machining of Ti6Al4V in terms of power output characteristics[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(3): 997-1008.
- [5] Mamalis A G, Vosniakos G C, Vaxevanidis N M, et al. Macroscopic and microscopic phenomena of electro-discharge machined steel surfaces: an experimental investigation[J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1987, 15(3): 335-356.
- [6] Ekmekci B. Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM)[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(23): 9234-9240.
- [7] Newton T R, Melkote S N, Watkins T R, et al. Investigation of the effect of process parameters on the formation and characteristics of recast layer in wire-EDM of inconel 718[J]. Materials Science and Engineering:A, 2009, 513: 208-215.
- [8] Schumacher B M. About the role of debris in the gap during electrical discharge machining[J]. CIRP Annals, 1990, 39(1): 197-199.
- [9] Lonardo P M, Bruzzone A A. Effect of flushing and electrode material on die sinking EDM[J]. CIRP Annals, 1999, 48(1): 123-126.
- [10] Li L, Gu L, Xi X C, et al. Influence of flushing on performance of EDM with bunched electrode[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(1): 187-194.
- [11] Zhang Y, Xu Z, Zhu D, et al. Drilling of film cooling holes by a EDM/ECM in situ combined process using internal and side flushing of tubular electrode[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(1): 505-517.
- [12] Wang Z Q, Tong H, Li Y, et al. Dielectric flushing optimization of fast hole EDM drilling based on debris status analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5): 2409-2417.
- [13] Singh N K, Singh Y, Sharma A. Experimental investigation of flushing approaches on EDM machinability during machining of titanium alloy[J]. Materials Today:Proceedings, 2021, 38: 139-145.
- [14] Zhang S S, Wang L Z, Zhou J P, et al. SEAM-ECM jet milling TC4 titanium alloy using gas-liquid mixed medium[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(11): 6979-6993.

第一作者: 付斐, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为短电弧特种加工技术。E-mail: 1136072910@qq.com

通信作者: 胡国玉, 女, 1977 年生, 副教授, 主要研究方向为短电弧特种加工技术。E-mail: xjhuguoyu@xju.edu.cn

(编辑 高扬)

(收修改稿日期: 2023-02-24)

文章编号: 20230724

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。