

# 超声辅助电解电火花线切割流场仿真及试验研究

蒋凌霄, 王艳\*

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

**摘要:** **目的** 将超声振动工艺引入电解电火花线切割加工, 研究分析超声振动对加工过程的影响规律, 并分析加工参数对加工性能的影响。**方法** 以镍钛记忆合金为加工材料, 对超声振动辅助电解电火花线切割加工进行仿真及试验研究。通过理论分析和有限元仿真分析, 对超声振动引入后对流场的影响规律进行深入研究; 通过正交试验, 分析了超声振动辅助电解电火花线切割的最佳工艺参数。**结果** 基于气泡在流场内的受力情况构建了数学模型, 超声振动引入后气泡脱离半径变小, 加速了气泡从电极丝上脱离。根据有限元仿真结果可知, 附加超声振动能使极间流场速度明显上升, 气体排除效率显著升高。正交试验结果表明, 脉冲宽度以及峰值电流对加工表面粗糙度值的影响显著, 超声振幅对加工表面粗糙度值的影响较小。对比试验结果表明, 超声振动能显著提高材料去除率, 平均增幅达 10%, 加工表面可以避免由过电解引起的点蚀现象。**结论** 提出的气泡脱离模型以及流场仿真为超声振动辅助电解电火花线切割加工机理研究提供了新的思路。加工参数对加工表面粗糙度值的影响程度依次为峰值电流 ( $I_p$ ) > 脉冲宽度 ( $T_{on}$ ) > 超声振幅 ( $A_{usv}$ ), 最优加工参数为  $T_{on}=12\text{ }\mu\text{s}$ 、 $I_p=6\text{ A}$ 、 $A_{usv}=8\text{ }\mu\text{m}$ 。将超声振动工艺与电解电火花线切割相结合, 在提高材料去除率的同时提高加工表面质量。

**关键词:** 超声振动; 电解电火花线切割; 表面粗糙度; 有限元分析; 流固耦合

**中图分类号:** V261.6+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)20-0166-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.20.014

## Flow Field Simulation and Experimental Study of Ultrasonic Vibration Assisted Wire Electrochemical Discharge Machining

JIANG Lingxiao, WANG Yan\*

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**ABSTRACT:** Due to the growing demand for high product performance in mould, medical equipment, and other manufacturing fields, more and more difficult-to-machine materials with unique properties were increasingly being used for research and application purposes. TiNi shape memory alloys (SMA) were a popular choice due to its excellent biocompatibility, corrosion resistance, and shape memory properties. However, this material was of great difficulty to machine by using traditional processes, as evidenced by significant tool wear and low-quality machined surfaces.

Wire electrochemical discharge machining (WECDM) was a non-contact, specialized machining without macro cutting force, which has high machining accuracy and good machining quality when working with difficult-to-machine metal materials.

收稿日期: 2024-04-20; 修订日期: 2024-04-29

Received: 2024-04-20; Revised: 2024-04-29

基金项目: 上海市自然科学基金 (23ZR1444700)

Fund: Natural Science Foundation of Shanghai (23ZR1444700)

引文格式: 蒋凌霄, 王艳. 超声辅助电解电火花线切割流场仿真及试验研究[J]. 表面技术, 2024, 53(20): 166-174.

JIANG Lingxiao, WANG Yan. Flow Field Simulation and Experimental Study of Ultrasonic Vibration Assisted Wire Electrochemical Discharge Machining[J]. Surface Technology, 2024, 53(20): 166-174.

\*通信作者 (Corresponding author)

In order to further enhance the processing efficiency, this paper presented a detailed study of a novel machining process called ultrasonic vibration assisted wire electrochemical discharge machining (USV WECDM), which combined ultrasonic vibration assisted process with wire electrochemical discharge machining process, and analyzed its effect on the machining process. The role of ultrasonic vibration on the machining process mechanism was studied in-depth to reveal its influence on the law. The impact of processing parameters on the machining performance was also analyzed through orthogonal and comparative experiments. The study investigated ultrasonic vibration assisted wire electrochemical discharge machining using nickel-titanium memory alloy as the processing material. The research included theoretical, simulation, and experimental aspects. Firstly, the influence of ultrasonic vibration on the radius of bubble detachment was investigated by theoretical analysis; secondly, the influence law on the flow field after the introduction of ultrasonic vibration was studied in depth by finite element simulation analysis; the optimum parameters of the ultrasonic vibration assisted wire electrochemical discharge machining process were analyzed by orthogonal tests; finally, the excellence of the ultrasonic vibration assisted wire electrochemical discharge machining process was analyzed by comparative tests. The mathematical model was based on the force of bubbles in the flow field. The introduction of ultrasonic vibration resulted in a lower bubble detachment radius, accelerating the detachment of bubbles from the electrode wire. The introduction of ultrasonic vibration significantly increased the velocity of the flow field between poles and improves the efficiency of gas exclusion, according to the results of finite element simulation. The orthogonal test revealed that the pulse width and peak current have a significant effect on the roughness of the machined surface, while the ultrasonic amplitude did not have much effect. Comparative experiments demonstrated that ultrasonic vibration could improve material removal rate by an average of 10%, and could prevent pitting phenomenon caused by over electrolysis on the machined surfaces.

The paper proposes a new bubble detachment model and flow field simulation for studying the processing mechanism of ultrasonic vibration assisted wire electrochemical discharge machining process. The influence of processing parameters on the surface roughness ( $Ra$ ) is as follows:  $I_p > T_{on} > A_{usv}$ . The optimal processing parameters are:  $T_{on}=12\ \mu s$ ,  $I_p=6\ A$ ,  $A_{usv}=8\ \mu m$ . Combining ultrasonic vibration assisted processing with wire electrochemical discharge machining process can significantly improve machining efficiency and prevent pitting on the machined surface caused by over-electrolysis to improve surface quality.

**KEY WORDS:** ultrasonic vibration; WECDM; surface roughness; finite element analysis; fluid-solid coupling

电火花线切割在加工过程中避免了传统机械加工过程中产生的宏观力, 在加工高硬度、强韧性以及低导热性的金属材料方面表现出色, 被广泛应用于航天航空、医疗器械等关键领域<sup>[1-3]</sup>。然而, 在拥有较高加工精度的同时, 随之面临的是加工表面重铸层厚度较大, 加工区域内介质循环效率较差以及加工产物无法及时排出等难题<sup>[4-5]</sup>。电解电火花线切割是一项将电火花加工与电解加工融合在一起的非接触加工工艺<sup>[6]</sup>, 利用电火花放电去除工件材料, 利用电解作用去除电火花线切割后工件表面产生的重铸层, 兼具了电火花加工和电解加工优势的同时, 克服了两者存在的弊端<sup>[7-8]</sup>。

近年来, 超声振动以其提高加工效率、促进流场介质循环等特点而作为辅助工艺被广泛应用<sup>[9-10]</sup>。一些学者通过试验方法, 验证了超声振动对于提高电解电火花加工质量具有重要意义。2014 年, 在硬脆性非导电材料的电解电火花钻削加工领域, 吕传伟<sup>[11]</sup>提出了结合超声振动的新方法, 并通过试验探究了超声振动对电解电火花铣削加工表面质量的影响, 并揭示了内在的作用规律。2019 年, 魏志远<sup>[12]</sup>针对玻璃

的有效加工, 将超声振动与微细电解电火花加工相结合, 试验结果表明, 超声振动在加工过程中提高了加工精度并有效减小了加工表面的粗糙度, 证明了超声振动在提高加工质量方面的显著效果。2023 年, Chen 等<sup>[13]</sup>为高质量加工复杂玻璃微结构, 提出了一种超声振动辅助电化学放电加工的方法。试验结果表明, 相比传统工况, 超声振动的引入有效降低了表面粗糙度达 80.99%, 能有效提高加工精度、加工稳定性和表面质量。目前, 针对超声振动辅助电解电火花线切割的研究多集中于试验分析, 对于其内在的加工机理分析较少。

在电解电火花线切割加工领域, 气泡管理被视为一个关键问题<sup>[14-15]</sup>。超声振动辅助电解电火花线切割加工原理如图 1 所示。在加工过程中, 电解反应在加工流场内产生大量气泡, 一方面, 黏附在电极丝上的气泡降低了电解质电导率, 降低了加工效率<sup>[16]</sup>; 另一方面, 脱离电极丝的气泡在狭窄流场内堆积, 不利于加工的正常进行<sup>[17]</sup>。因此, 本文对超声振动辅助电解电火花线切割复合工艺下的气泡脱离模型进行理论分析, 通过 COMSOL 软件对流场流速进行仿真分析,

并在此基础上进一步仿真分析超声振动对流场内的气体排出效率。同时采用正交试验研究脉冲宽度、电流峰值以及超声振幅对材料去除率以及表面粗糙度的影响,对超声振动辅助电解电火花线切割的深入研究有重要意义。

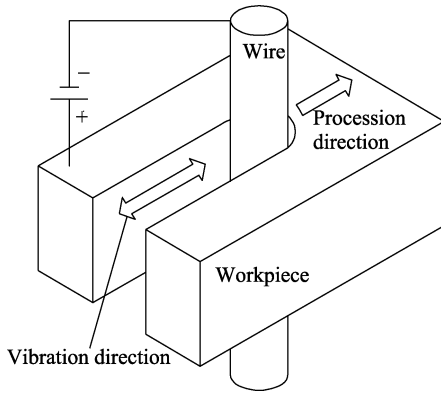


图 1 超声振动辅助电解电火花线切割原理示意图  
Fig.1 Schematic diagram of the principle of USV WECDM

## 1 超声振动下气泡脱离模型

气泡在流场中受力情况复杂,为了简化分析过程,通常将气泡的几种关键受力:浮力、表面张力、阻力和升力以及超声振动产生的交替阻力作为分析对象。基于上述力的作用,对气泡周围的力平衡进行了详细的分析,并对模型与条件进行简化<sup>[18]</sup>: 1) 加工介质视为不可压缩液体; 2) 加工过程中电解质温度不变,忽略由温度场效应引起的力; 3) 在气泡即将从工具电极脱离时,假定它们具有一致的尺寸,并且均以球形的形态存在。

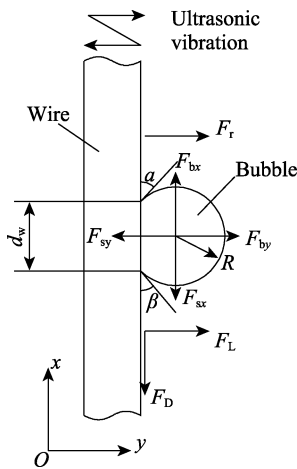


图 2 极间气泡受力分析模型  
Fig.2 Interpolar bubble force analysis model

图 2 显示了各种作用在气泡上的力,作用在气泡上的力可以分解为沿  $x$  和  $y$  坐标的分量,从而导致气泡在相应方向上产生脱离移动趋势。

1) 浮力。浮力是由压力和重力对气泡的作用力组成的,可以用式 (1) 表示<sup>[19]</sup>。 $V_B$  为气泡体积,由式 (2) 可得。

$$\begin{cases} F_{bx} = (\rho_L - \rho_B)gV_B \\ F_{by} = \frac{1}{4} \left[ (\rho_B - \rho_L)gR + \frac{2\sigma}{R} \right] \pi d_w^2 \end{cases} \quad (1)$$

$$V_B = \frac{1}{3} \pi R^3 (1 + \cos \theta)^2 (2 - \cos \theta) \quad (2)$$

其中,  $\rho_B$  为加工介质的密度;  $\rho_L$  为气泡内气体的密度;  $\sigma$  为气泡内气体与加工介质之间的表面张力系数;  $\theta$  为液-气和液-固界面之间的接触角;  $R$  为气泡半径;  $d_w$  为气泡与线电极圆形接触面的直径。

2) 表面张力。在  $x$  方向上表面张力分力与浮力以及气泡上的阻力相平衡,在  $y$  方向上表面张力分力与超声激振力产生的阻力相平衡,保持气泡附着在电极丝上。表面张力在  $x$ 、 $y$  方向上的分力分别为<sup>[20]</sup>:

$$\begin{cases} F_{sx} = -1.25d_w \sigma \frac{\pi(\alpha - \beta)[\sin \alpha + \sin \beta]}{\pi^2 - (\alpha - \beta)^2} \\ F_{sy} = -d_w \sigma \frac{\pi}{\alpha - \beta} [\cos \beta - \cos \alpha] \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为气泡与电极丝的后退角和前进角。

3) 阻力和升力。由于气泡受到  $y$  方向的流速影响,可以推导出黏附在电极丝上气泡所受的阻力和升力,可以表示为<sup>[21]</sup>:

$$\begin{cases} F_D = -\frac{1}{2} \xi_D \rho_L v^2 A_a e_x \\ F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_L v^2 A_a e_y \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\xi_D$  和  $C_L$  分别为阻力系数和升力系数;  $v$  是流场流速;  $A_a$  是气泡垂直于流动方向的最大横截面,见式 (5)。

$$A_a = \pi R^2 \left[ 1 - \frac{\theta - \cos \alpha \sin \theta}{\pi} \right] \quad (5)$$

4) 超声激振力带来的阻力。超声振动带动黏附在线电极上以及周围的气泡做正弦往复运动,其所受工作液阻力的大小和方向周期变化,根据气泡脱离的临界点,现取极限位置对超声激振力带来的阻力进行分析,如式 (6) 所示<sup>[22]</sup>。

$$F_r = 6\pi \rho_L \mu UR \left( \frac{2}{3} + \left[ \left( \frac{12}{Re} \right)^n + 0.796^n \right]^{\frac{1}{n}} \right) \quad (6)$$

其中,  $\mu$  为运动黏度;  $Re$  为雷诺数;  $U$  为电解质平均流速;  $n$  为常数,取 0.65。

平均流速  $U$  的求解如式 (7) 所示。

$$U = A_{usv} \omega \sin \pi(\omega t) \quad (7)$$

其中,  $A_{usv}$  为超声振幅;  $\omega$  为角速度。

当气泡在  $x$ 、 $y$  2 个方向受力达到平衡时,气泡附

着在电极丝表面上,而当其中一个平衡被打破时,气泡会脱离电极丝。 $x$ 、 $y$  方向上气泡的受力如式 (8) 所示。

$$\begin{cases} \Sigma F_x = F_{bx} + F_{sx} + F_D = 0 \\ \Sigma F_y = F_{by} + F_{sy} + F_L + F_r = 0 \end{cases} \quad (8)$$

代入可得:

$$\begin{cases} \Sigma F_x = (\rho_L - \rho_B)gV_B - \frac{1}{2}\xi_D\rho_L v^2 A_a + \\ \quad 1.25d_w\sigma \frac{\pi(\alpha - \beta)}{\pi^2 - (\alpha - \beta)^2}(\sin\alpha + \sin\beta) = 0 \\ \Sigma F_y = -\frac{1}{4}\left[(\rho_L - \rho_B)gR + \frac{2\sigma}{R}\right]\pi d_w^2 - \\ \quad d_w\sigma \frac{\pi}{\alpha - \beta}(\cos\beta - \cos\alpha) + \frac{1}{2}C_L\rho_L v^2 A_a e_y + \\ \quad 6\pi\rho_L\mu UR\left(\frac{2}{3} + \left[\left(\frac{12}{Re}\right)^n + 0.796^n\right]^{-\frac{1}{n}}\right) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

由式 (9) 可知,在  $x$  方向气泡脱离时的半径随着流场内工作液流速增大呈减小趋势。然而,由于电解电火花线切割加工区域是较窄的缝隙,增大流速可行性较差;在  $y$  方向,超声振动的引入可以有效减小脱离时的气泡半径。

2 仿真模型建立

在超声振动辅助电解电火花线切割加工过程中,电极丝进给方向前侧的同心圆柱半环形缝隙为主要加工区域,因此,选择同心圆柱环形缝隙区域的流场为研究对象。由于电极丝与工件表面距离较小且极间流动状态为层流,流场区域可视为平行平板缝隙流动<sup>[23]</sup>。在此基础上,可以将三维环形缝隙流场简化为二维模型<sup>[24]</sup>,沿流场的高度方向取截面建立间隙流场的二维几何模型,简化模型如图 3 所示。

在二维简化模型的基础上,使用 COMSOL Multiphysics 软件建立仿真模型,并根据表 1 设定仿真相关参数。

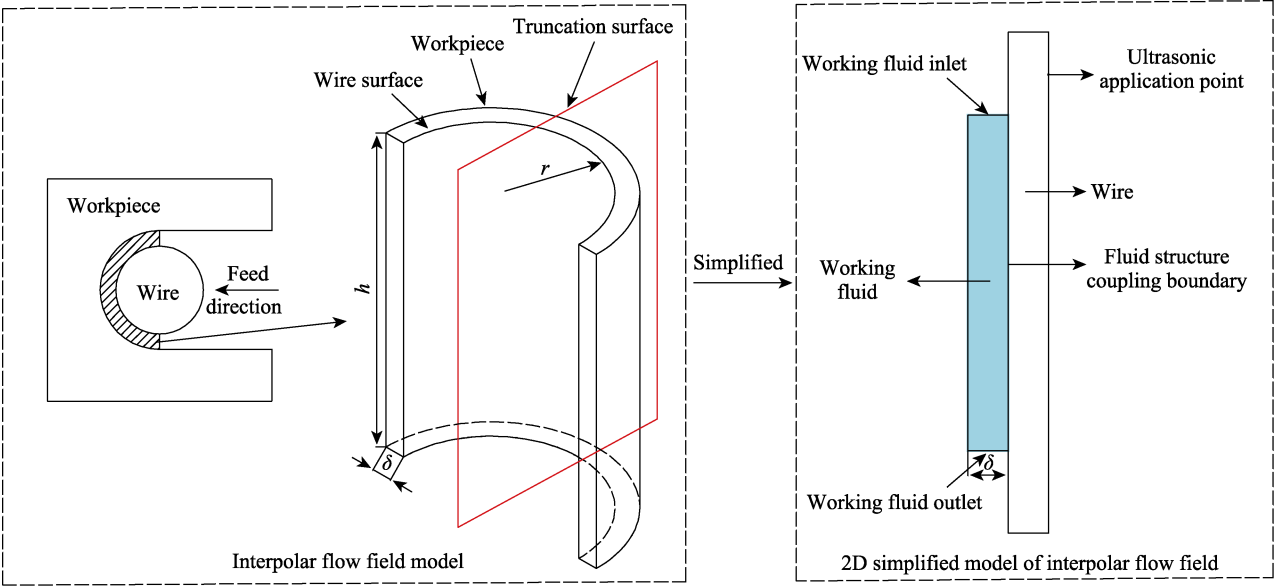


图 3 极间流场的简化模型  
Fig.3 Simplified model of the interpolar flow field

表 1 有限元仿真参数  
Tab.1 Finite element simulation parameters

Parameter	Value
Wire diameter/mm	0.2
Flow field width/ $\mu\text{m}$	40
Workpiece thickness/mm	8
Inlet pressure/MPa	0.6
Outlet pressure/MPa	0
Ultrasonic vibration frequency/kHz	20

由于本文极间流场的仿真旨在研究加工过程中的流场变化以及极间气泡排出情况,仅需要对工作液以及电极丝进行材料设置,此处设置工作液为去离子水,电极丝材料为铜。而后通过对网格的合理划分,网格划分结果如图 4 所示。

将流场段使用更为精细的网格进行划分,规定其最小单位大小为  $10^{-7}\text{ m}$ ,规定其最大单位大小为  $1.5\times 10^{-7}\text{ m}$ 。为施加电极丝振动,超声激振点位置设定在离电极丝上端  $1\text{ mm}$  处,将网格设定为动网格。通过



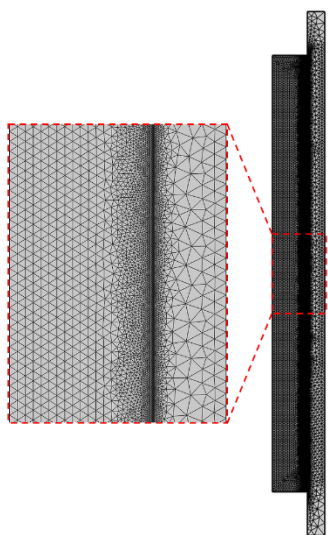


图 4 网格划分

Fig.4 Meshing of the model

多物理场模块中的流固耦合模块,将电极丝的振动状态传递到流场中。计算时,选择瞬态研究,对超声振动多个周期内的计算结果进行分析。

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 超声振动下的极间流场流速分析

传统电解电火花极间流场流速的仿真结果如图 5 所示,其流速处于稳态,且流速沿轴向方向并没有发生变化。从图中可以观察到,由于壁面边界层现象,流体在壁面附近速度显著减小,电极丝表面脱离的气泡排除速率较慢,影响电解加工的效率以及稳定性。

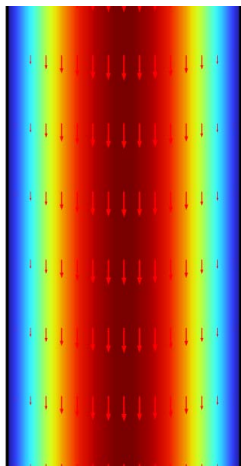


图 5 电解电火花极间流场流速分布图  
Fig.5 Flow velocity distribution of WECDM inter-pole flow field

选取超声振幅为  $12\text{ }\mu\text{m}$ , 超声振动频率为  $20\text{ kHz}$  的超声振动辅助电解电火花线切割加工极间流场流速仿真结果,观察加工区域流场状态的变化情况,如图 6 所示。

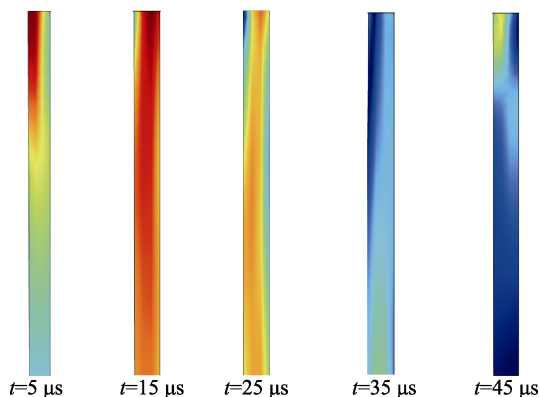


图 6 超声振动辅助电解电火花极间流场流速分布图  
Fig.6 Flow velocity distribution of USV WECDM inter-pole flow field

从图 6 中可以观察到,不同时刻下的工作液速度在径向方向上出现了明显的振荡,且壁面边界层现象相较传统工况下的极间流场有了明显改善,因此工件表面周边的流场流速也会因为超声振动的辅助而发生周期性振动,从而使得加工间隙流场更有助于排除加工区域内产生的气泡,进而提高加工效率以及稳定性。为进一步研究超声振动对流场状态的影响,本文对超声振幅为  $4$ 、 $8$ 、 $12$ 、 $16\text{ }\mu\text{m}$ , 超声振动频率为  $20\text{ kHz}$  情况下的工作液沿  $y$  方向上流速随时间变化曲线进行了仿真,并将结果与传统工况下进行对比,仿真结果如图 7 所示。

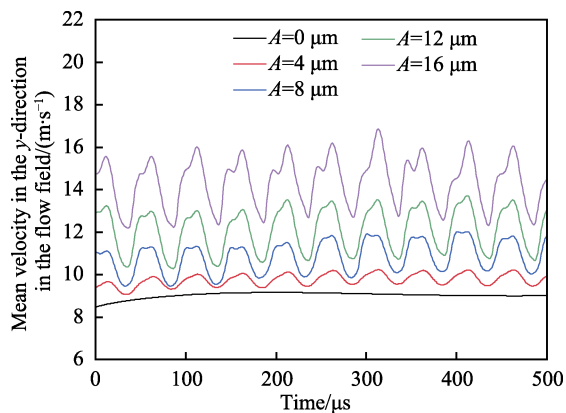


图 7  $y$  方向上流速随变化曲线  
Fig.7 Flow velocity versus change curve in the  $y$ -direction

由图 7 可知,附加超声振动后,极间流场内  $y$  方向上的流速显著提升,结合式 (9) 可知,超声振动能够减小气泡脱离半径。同时,随着超声振幅的提高,极间流场的流速也随之提高,这有利于促进流场内气泡以及电蚀产物排出并提高工作液消电离速率,从而提高加工效率以及加工稳定性。

#### 3.2 超声振动辅助下的气泡排除效率仿真

本文将电极丝上脱离后进入流场的气泡模拟成粒子,量化了超声振动辅助工艺对极间气泡去除的影响,取传统工况以及超声振幅为  $12\text{ }\mu\text{m}$  2 种工况进行

仿真, 仿真结果如图 8 所示。由图 8 可知, 气体粒子在短时间的快速上升后趋于稳定, 超声振动辅助下流场内的平均气含率相比传统工况减小了约 56.7%, 结果表明超声振动对于极间气泡的排除有重要提升作用。

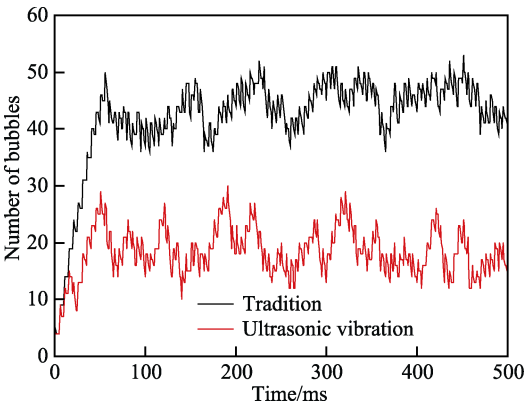


图 8 2 种工艺下气泡排除效率对比图  
Fig.8 Comparison of bubble removal efficiency between the two processes

4 超声振动辅助电解电火花线切割加工试验

超声振动辅助电解电火花线切割加工过程是一个复杂的物理化学过程。研究表明<sup>[25-26]</sup>, 脉冲宽度、峰值电流、超声振幅等均会对加工表面粗糙度产生较大的影响。结合试验机床推荐的加工参数, 采用三因素四水平的正交试验方法, 分析脉冲宽度、峰值电流、超声振幅对超声振动辅助电解电火花线切割加工表面粗糙度值的影响, 正交试验参数见表 2。为了验证超声振动辅助电解电火花线切割加工的优越性, 进行了电解电火花线切割和超声振动辅助电解电火花线切割加工的对比试验。

表 2 正交试验参数 Tab.2 Orthogonal experimental parameters			
Level	$t_{on}/\mu s$	$I_p/A$	$A_{usv}/\mu m$
1	6	6	4
2	9	8	8
3	12	10	12
4	15	12	16

在 DK7625P 慢走丝电火花线切割机床上对镍钛形状记忆合金进行正交和对比试验, 试验平台如图 9 所示。在加工试验过程中, 利用 DWS 位移测量仪记录了电极丝的振动特性。利用霍尔电流传感器、高压探头和示波器监测和采集放电电流和电压, 并从机床控制面板上记录伺服进给速度, 检测装置如图 10 所示。

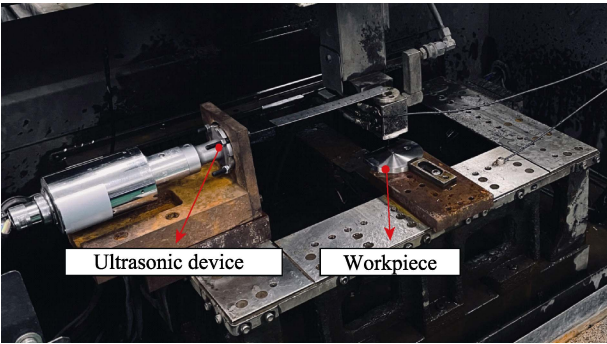


图 9 试验装置  
Fig.9 Test equipment

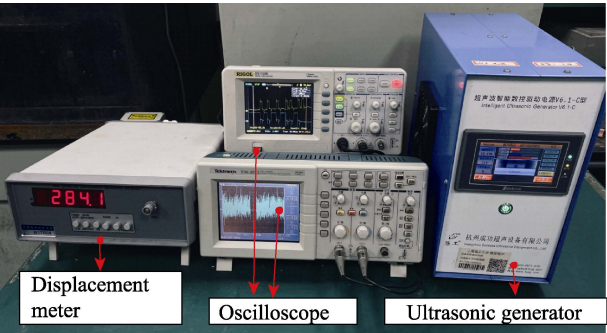


图 10 检测装置  
Fig.10 Inspection devices

5 试验结果分析

5.1 放电波形分析

电流环和示波器分别用于检测和记录加工过程中电压和电流的变化。图 11 分别给出了在脉冲宽度为 12  $\mu s$ 、峰值电流为 12 A 的工况下, 电解电火花线切割和超声振动辅助电解电火花线切割的放电波形图, 图中黑色线条代表电压变化, 红色线条代表电流变化。

由图 11a 可以观察到, 电解电火花线切割加工过程中存在较多的非正常放电, 导致切割过程中产生不规则的放电形状并在加工区域引起工件表面产生烧痕、熔融、氧化等现象, 从而导致切割质量下降。而从图 11b 中可以观察到, 超声振动辅助电解电火花线切割加工过程中不正常放电数量明显减少。造成这种差异的原因在于电解电火花线切割的排除效率较差, 气泡聚集在放电点及周边工作液中, 使工作液导电不完全, 导致非正常放电, 而超声振动辅助电解电火花线切割提高了工作液流场的振荡并协助气泡的排除, 提升了放电的稳定性。

5.2 试验结果分析

加工结束后, 采用 Keyence VHX-5000 三维微米级表面拓扑测试仪对工件表面的粗糙度和三维微观

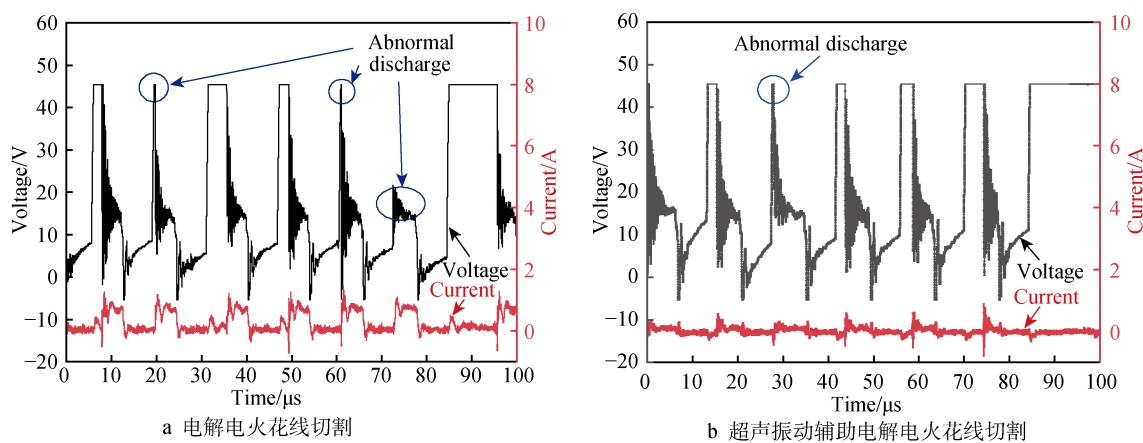


图 11 放电电压电流对比  
Fig.11 Comparison of discharge voltage and current: a) WECDM; b) USV WECDM

形貌进行检测。在切削后的工件上分别取 3 个点进行测量，然后取平均值，结果见表 3。对表 3 中的表面质量参数进行极差分析以确定最优加工参数，结果见表 4。

表 3 正交试验结果  
Table 3 Orthogonal experimental results

No.	$t_{on}/\mu s$	$I_p/A$	$A_{usv}/\mu m$	$V_{MRR}/(mm^3 \cdot min^{-1})$	$Ra/\mu m$
1	6	6	4	0.35	0.39
2	6	8	8	0.60	0.48
3	6	10	12	0.83	0.68
4	6	12	16	1.02	0.72
5	9	6	12	0.42	0.5
6	9	8	16	0.64	0.8
7	9	10	4	0.83	1.05
8	9	12	8	1.02	1.33
9	12	6	16	0.54	0.37
10	12	8	12	0.81	0.41
11	12	10	8	1.04	0.52
12	12	12	4	1.23	0.55
13	15	6	8	0.64	0.52
14	15	8	4	0.89	0.73
15	15	10	16	1.08	1.13
16	15	12	12	1.23	1.34

表 4  $Ra$  方差分析  
Tab.4 Variance analysis of  $Ra$

Parameters	$t_{on}$	$I_p$	$A_{usv}$
K1	0.567 5	0.445 0	0.730 0
K2	0.920 0	0.605 0	0.712 5
K3	0.512 5	0.845 0	0.732 5
K4	0.800 0	1.035 0	0.755 0
R	0.407 5	0.590 0	0.042 5

通过表 4 的分析结果，可以得出最优加工参数为  $t_{on}=12\ \mu s$ 、 $I_p=6\ A$ 、 $A_{usv}=8\ \mu m$ ，对试验结果  $Ra$  的影响从大到小依次为：峰值电流、脉冲宽度、超声振幅。

超声振幅对试验结果  $Ra$  影响较小的原因在于电解电火花线切割不同于传统机械加工工艺，通过电火花放电蚀除来达到材料去除的目的，超声振动的引入主要对流场状态产生影响，对于实际加工过程的影响较弱。图 12 为不同工况下材料去除率的对比图。

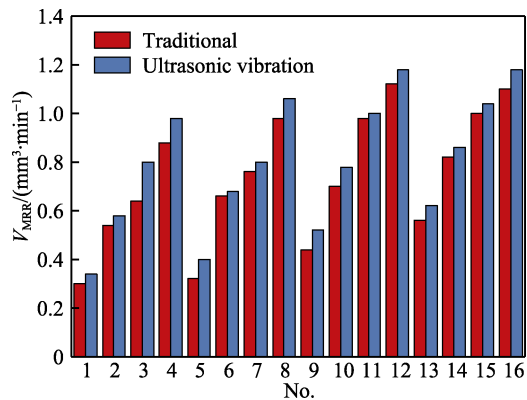


图 12 材料去除率对比  
Fig.12 Material Removal Rate Comparison

由图 12 可知，超声振动提高了电解电火花的加工效率，平均达 10.2%。结合前文可知，这是因为电极丝的超声振动提高加工区域内的流场流速，更有效地排出了工作介质中的气泡以及其他加工产物，提高了工作介质的电导率以及加工过程的加工稳定性，从而提高了材料去除率。分析正交试验结果，加工表面粗糙度与切削参数之间的关系如图 13 所示。

从图 13 可知，超声振动对表面粗糙度值的影响不大，总体呈现先减小后增大的趋势。随着脉冲宽度以及峰值电流的增加，工件表面粗糙度呈上升趋势，这是由于脉冲宽度的逐渐增加会使单次放电凹坑体积增大，凹坑体积的增大就意味着工件表面粗糙度的增加。而峰值电流的增加会使电火花放电能量增加，导致放电通道范围变大、放电凹坑变宽变深，更多的材料被熔化在一次放电中变为熔融金属，极间无法冲洗的熔融金属更多，因此加工表面的重铸层厚度会增大，从而使工件表面粗糙度值增加。



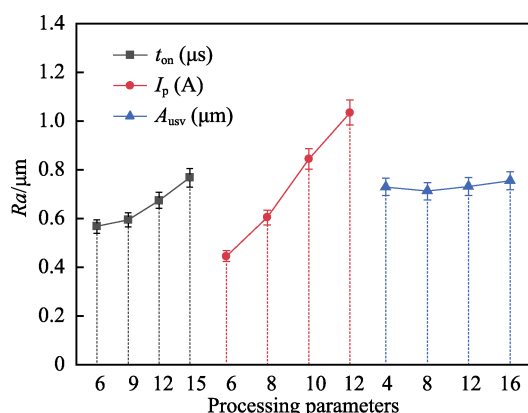


图 13 加工参数对表面粗糙度值的影响

Fig.13 Effect of machining parameters on surface Ra

### 5.3 工件表面三维形貌分析

图 14 给出了脉冲宽度为 6  $\mu\text{s}$ 、峰值电流为 6 A 工况下, 2 种工艺加工后工件表面的三维形貌。由图 14 可知, 在此加工参数下, 电解电火花线切割工件表面最大高度差为 5.77  $\mu\text{m}$ , 高于超声振动辅助电解

电火花线切割加工后表面的最大高度差 4.97  $\mu\text{m}$ , 各组电解电火花线切割加工工件的最大表面高度差较超声振动辅助电解电火花线切割平均减小了 10.98%。同时, 如图 14a 所示, 电解电火花线切割加工表面出现点蚀现象, 而图 14b 中则无此现象。这是由于在小参数下加工时间过长, 部分区域表面的重铸层厚度较薄, 导致重铸层溶解后过电解出现的点蚀现象, 而超声振动能够提高加工效率从而避免了过电解的发生。综合分析表明, 超声振动辅助工艺能够更有效地发挥电解作用, 从而实现更加平整的表面处理效果。

综上, 超声振动辅助电解电火花线切割工艺下, 超声振动使由电解作用在电极丝表面生成气泡的脱离半径减小, 从而使气泡更快地进入间隙流场中, 而超声振动同时打破了极间流场的边界层现象, 使气泡脱离后进入高速层流中从极间排除, 提高了极间流场的电解液电导率, 从而提高了电解加工去除电火花线切割加工表面形成的重铸层和凹坑的效率并使加工表面粗糙度值减小, 提高了加工表面的整体质量。

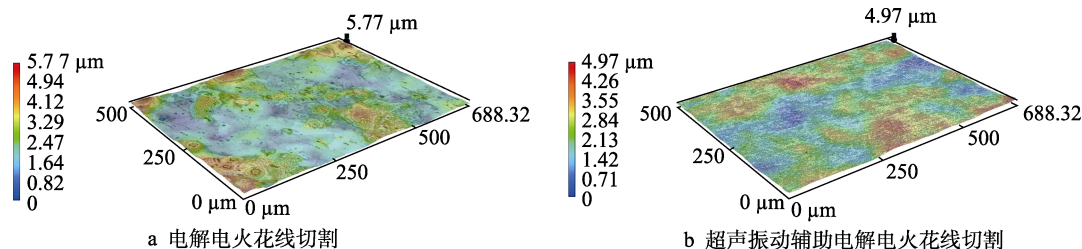


图 14 三维表面形貌对比

Fig.14 Three-dimensional surface topography comparison: a) WECDM; b) USV WECDM

## 6 结论

通过理论分析、有限元仿真分析以及试验研究, 研究超声振动对电解电火花线切割加工流场以及加工参数对加工性能的影响, 得到以下结论:

1) 通过对电极丝上气泡受力情况进行合理的简化及受力分析, 结果显示超声振动能够减小气泡脱离半径使气泡能够更快地脱离电极丝, 进而从流场中被排除, 从而提高加工效率。

2) 基于流固耦合, 将超声振动的影响作用于流场, 分析了超声振动影响下的流场状态, 并将气泡作为粒子, 对比传统以及超声振动辅助下气泡的排除效率, 结果显示, 超声振动能够显著提升流场流速并加快气泡排除效率。

3) 正交试验结果表明, 对加工效率影响的显著性依次为峰值电流>脉冲宽度>超声振幅, 最优加工参数为  $t_{\text{on}}=12 \mu\text{s}$ 、 $I_p=6 \text{ A}$ 、 $A_{\text{usv}}=8 \mu\text{m}$ 。

4) 对比试验结果表明, 超声振动对提高材料去除率有明显作用, 超声振动辅助电解电火花线切割的加工表面没有过电解产生的点蚀现象, 表面质量得到明显改善。

### 参考文献:

- [1] 曹凤国. 电火花加工[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [2] CAO F G. Electro-Discharge Machining[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [3] MOHD ABBAS N, SOLOMON D G, FUAD BAHARI M. A Review on Current Research Trends in Electrical Discharge Machining (EDM)[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(7/8): 1214-1228.
- [4] HO K H, NEWMAN S T. State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM)[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(13): 1287-1300.
- [5] AHMED S, SPEIDEL A, MURRAY J W, et al. Electrolytic-Dielectrics: A Route to Zero Recast Electrical Discharge Machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2022, 181: 103941.
- [6] PRAMANIK A. Developments in the Non-Traditional Machining of Particle Reinforced Metal Matrix Composites[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 86: 44-61.
- [7] ELHAMI S, RAZFAR M R. Effect of Ultrasonic

- Vibration on the Single Discharge of Electrochemical Discharge Machining[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2018, 33(4): 444-451.
- [7] NGUYEN M D, RAHMAN M, WONG Y S. Simultaneous Micro-EDM and Micro-ECM in Low-Resistivity Deionized Water[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 54: 55-65.
- [8] LIU Y, FANG X L, QU N S, et al. Simultaneous Gas Electrical Discharge and Electrochemical Jet Micromachining of Titanium Alloy in High-Conductivity Salt Solution[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 317: 118000.
- [9] YANG Z C, ZHU L D, ZHANG G X, et al. Review of Ultrasonic Vibration-Assisted Machining in Advanced Materials[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 156: 103594.
- [10] GUO Z N, LEE T C, YUE T M, et al. A Study of Ultrasonic-Aided Wire Electrical Discharge Machining[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 63(1/2/3): 823-828.
- [11] 吕传伟. 基于超声振动的电解电火花加工工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.  
LYU C W. Research on Electrochemical EDM Technology Based on Ultrasonic Vibration[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [12] 魏志远. 超声振动辅助微细电解电火花加工技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.  
WEI Z Y. Study on Ultrasonic Vibration Assisted Micro-Electrolytic EDM Technology[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [13] CHEN Z H, LIU Y, WANG T B, et al. Ultrasonic Assisted Electrochemical Discharge Milling of Complex Glass Microstructure with High-Quality[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 94: 94-106.
- [14] LIU H B, PAN L M, WEN J. Numerical Simulation of Hydrogen Bubble Growth at an Electrode Surface[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2016, 94(1): 192-199.
- [15] XU K, ZENG Y B, LI P, et al. Vibration Assisted Wire Electrochemical Micro Machining of Array Micro Tools[J]. *Precision Engineering*, 2017, 47: 487-497.
- [16] ANGULO A, VAN DER LINDE P, GARDENIERS H, et al. Influence of Bubbles on the Energy Conversion Efficiency of Electrochemical Reactors[J]. *Joule*, 2020, 4(3): 555-579.
- [17] TAQIEDDIN A, NAZARI R, RAJIC L, et al. Review—Physicochemical Hydrodynamics of Gas Bubbles in Two Phase Electrochemical Systems[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2017, 164(13): E448-E459.
- [18] 李松松. 超声振动辅助微细电解电火花线切割加工技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.  
LI S S. Research on Ultrasonic Vibration-Assisted Micro-Electrolysis WEDM Technology[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [19] ZHANG D K, ZENG K. Evaluating the Behavior of Electrolytic Gas Bubbles and Their Effect on the Cell Voltage in Alkaline Water Electrolysis[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(42): 13825-13832.
- [20] DUHAR G, COLIN C. Dynamics of Bubble Growth and Detachment in a Viscous Shear Flow[J]. *Physics of Fluids*, 2006, 18(7): 077101.
- [21] VAN HELDEN W G J, VAN DER GELD C W M, BOOT P G M. Forces on Bubbles Growing and Detaching in Flow along a Vertical Wall[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, 38(11): 2075-2088.
- [22] KLAUSNER J F, MEI R, BERNHARD D M, et al. Vapor Bubble Departure in Forced Convection Boiling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, 36(3): 651-662.
- [23] WANG Y, WANG Y X, XIONG W, et al. Study on Motion and Distribution of Debris in USV-MF Complex-Assisted WEDM-LS[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 116(1): 667-683.
- [24] 刘志东, 王振兴. 基于极间流场模型分析的高速走丝电火花线切割技术[J]. *上海交通大学学报*, 2011, 45(1): 61-65.  
LIU Z D, WANG Z X. Research on High Speed Wire-Cut Electrical Discharge Machine Based on Analysis of Inter-Electrode Flow[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2011, 45(1): 61-65.
- [25] ZHANG Q H, DU R, ZHANG J H, et al. An Investigation of Ultrasonic-Assisted Electrical Discharge Machining in Gas[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(12/13): 1582-1588.
- [26] ABDULLAH A, SHABGARD M R, IVANOV A, et al. Effect of Ultrasonic-Assisted EDM on the Surface Integrity of Cemented Tungsten Carbide (WC-Co)[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 41(3): 268-280.