

微细电火花加工微深槽类零件工艺技术研究

魏国锋, 毕可明

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要 针对铝合金深槽类零件微细电火花加工中电参数匹配难、材料蚀除机理不明确等问题, 为提升加工精度与工艺稳定性, 本研究采用微细电火花加工机床制备成形电极, 通过多组电参数对比试验, 系统探究不同电参数对铝合金微细加工效果的影响, 确定适用于深槽类零件的理想工艺参数。在此基础上, 建立含矩形恒放电通道热源模型的分子动力学仿真模型, 复现微细放电加工动态过程。通过仿真分析, 揭示微细电火花加工材料蚀除机理, 阐明不同能量密度对熔融区宽度的影响规律。研究结果旨在为铝合金微深槽类零件微细电火花加工提供可靠工艺依据与理论参考, 进而提升微结构加工质量与效率。

关键词 微细电火花; 微深槽; 分子动力学

中图分类号: TG661

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.003

0 引言

在天线等产品中存在着众多的微细结构, 如天线单元过渡波导及波纹喇叭天线等。在天线单元过渡波导中存在多级阶梯台阶结构, 各台阶只有 0.3 mm 的差别, 且表面光洁度及精度要求高; 在波纹喇叭天线中, 天线末端存在微小尺寸的矩圆过渡结构以及矩形结构, 内径尺寸最小处只有 0.279×0.559 mm, 且结构位置较深, 加工不便, 难度大。由于天线产品性能的要求, 对产品结构、精度及表面粗糙度等有较高的要求, 加工时外形及精度等达不到要求时对产品性能有极大的影响。此类产品因产品结构及刀具条件等的限制, 通常无法采用常规的切削加工方式或常规的加工方式难度极大, 适宜采用微细电火花等特种加工方法。因此, 有必要对微细电火花加工微深槽类零件的工艺方法及原理进行研究。

线电极放电磨削(Wire Electro-discharge Grinding, WEDG)技术使得微细电火花加工技术进入了实用化阶段^[1]。国内高长水等^[2]在自制的微细电火花加工装置加工出直径 $\Phi 25 \mu\text{m}$ 、深 150 μm 的孔。赵万生教授团队^[3]设计并研制一台微细电火花系统, 在该系统上加工出直径仅为 $\Phi 8 \mu\text{m}$ 的微小孔。李勇等^[4]开发出一种采用蠕动式微进给机构的微细电火花加工装置, 加工最小孔径小于 50 μm , 孔的深宽比达到 10 以上。贾振元教授课题组^[5]搭建了微细电火花加工设备, 并就设备的检测方法和控制策略进行了分析研究。除加

工孔类结构外, 微细电火花机床还可以加工各类异形三维结构^[6]。

自 90 年代以来, MD 方法已广泛应用于纳米尺度的切削和磨削机理研究^[7], 而对电火花加工过程的 MD 模拟研究尚少。Shimada 等^[8]采用 MD 方法分析了钨电极针尖化结构的形成, 结果表明针尖化结构的形成是由于大的径向外力和电极表面产生的薄融化层。崔景芝等^[9]采用粒子模拟方法, 模拟电火花加工过程放电通道的形成过程, 结果显示放电通道位形表现为负极端具有喇叭口的腰鼓形。杨晓东等^[10]采用 MD 方法模拟微细电火花加工过程, 结果发现材料的蚀除机理可以通过气化和超热金属的气泡膨胀两种方式来解释。由于放电加工中材料蚀除时间极短, 且放电空间极小, 用实验手段很难对电火花加工材料的微观去除机理进行观察。因此, 有必要开展微细电火花加工过程的 MD 仿真。

本文开展微细电火花加工带有微细深槽微小零件的试验研究, 同时对其加工工艺进行 MD 模拟研究, 掌握微槽结构的微细电火花加工工艺参数, 揭示微细电火花成形过程中的若干变形机理。

1 实验及模拟条件

1.1 实验条件

本实验采用自行研制的微细电火花加工平台。该设备基于脉冲放电热蚀原理, 通过工具电极与工件电极间在绝缘介质中产生瞬态高温, 实现对导电材料的

作者简介: 魏国锋(1971-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 反应堆热工水力。

微米级精密去除。其优势在于能够加工高强度、高硬度及高脆性等传统方法难以处理的金属材料，且加工过程宏观作用力小，适用于复杂三维微结构制造。

实验中固定工艺参数（包括电极材料、工作介质及伺服电压等），并将加工时间设定为16分钟，以确保不同工况结果的可比性。重点考察峰值电流与脉冲宽度这两个关键电参数对加工性能的影响，设计了不同参数的实验矩阵，揭示其对材料去除率、表面质量及电极损耗的作用规律。

本实验所用工具电极为紫铜材料。其制备过程分为两个主要步骤：首先，采用慢走丝线切割方法对紫铜坯料进行粗加工，获得接近目标尺寸的电极毛坯；其次，在微细电火花机床上，利用反拷块加工法对电极毛坯进行在线精密修整与成形。该方法通过在机床内部使待修整电极与反拷块进行对向放电，逐层蚀除多余材料，最终制备出微细工具电极。

1.2 分子动力学仿真模型

为从原子尺度深入探究微细电火花加工中单晶铝材料的蚀除机理，弥补实验观测在微观过程与瞬时动态上的局限，本研究构建了分子动力学（MD）仿真模型。仿真模型尺寸设定为 $30a_0 \times 30a_0 \times 12a_0$ ，其中 a_0 为单晶铝的晶格常数（0.404 nm）。模型共包含约 4.5×10^4 个原子。工件顶面取向设定为(010)晶面，x方向为[100]晶向，y方向为[001]晶向。

为模拟工件在实际加工中的约束状态，模型底部最外两层原子被设定为固定层，以模拟基体约束。其上相邻两层原子设置为恒温层，通过速度标定的方式控制其温度恒定在293 K（室温），以模拟加工过程中工件内部热量的变化。其余所有原子构成牛顿层，其运动服从牛顿第二定律，通过积分运动方程获得其动态轨迹。仿真过程模拟单个放电脉冲的作用，设定放电作用时长为 $4.8 \mu\text{s}$ ，以模拟脉冲能量的沉积过程。随后设定 $16 \mu\text{s}$ 的弛豫时间，用于观察放电结束后系统的能量重新分布、原子重组以及最终蚀坑形貌的稳定过程。

1.2.1 势函数

本文工件材料Al原子间的相互作用采用嵌入原子势（EAM）^[11]描述：

$$E = \sum_i \left[\frac{1}{2} \sum_j \phi(r_{ij}) + F(\rho_i) \right] \quad (1)$$

$$\rho_i = \sum_j f(r_{ij}) \quad (2)$$

式（1）中， E 为系统的总能量， ρ_i 为除第 i 个原子以外的所有其它原子的核外电子在第 i 个原子处产生的电子云密度之和， $\phi(r_{ij})$ 和 $F(\rho_i)$ 分别为势能和嵌入能， $f(r_{ij})$ 为电子密度分布函数。

1.2.2 热源分布

在本分子动力学仿真模型中，为模拟放电通道的能量输入，采用恒定的矩形热源模型。依据高斯分布率进行速度标定，对工件表面中心特定矩形区域内的原子施加7 000 K的初始高温。通过调整该热源作用的矩形截面面积及其深度，可有效调节输入至工件材料的能量密度，从而研究不同放电能量条件下单晶铝的微观蚀除行为。

2 结果和讨论

2.1 实验结果

基于前述实验方案，探究了峰值电流与脉冲宽度对微细电火花加工铝合金性能的关键影响，表面粗糙度（Ra）值随峰值电流的增加而上升。其微观机理在于，峰值电流的增大直接导致单脉冲放电能量的增强，使得放电蚀坑的尺寸与深度增大，从而恶化了表面形貌。在本实验参数范围内，可获得的最小表面粗糙度约为 $0.1 \mu\text{m}$ 。随着峰值电流的增大，更高的单脉冲能量带来了更强烈的材料蚀除效应。与此同时，工具电极的损耗量也随之增加。这表明，虽然提高峰值电流能提升加工效率，但表面质量变差和电极损耗加快。为进一步评估电极利用率，在获得相同打孔深度的前提下，随着脉冲宽度的减小，单位电极损耗量显著增大。这意味着，采用过短的脉冲宽度虽然有利于获得更精细的表面，但会导致电极的相对损耗加剧，加工成本升高。其物理原因在于，过短的脉宽使得放电能量在极短时间内高度集中，加剧了电极材料的汽化与喷溅损耗。

为实现高效率、高质量与低成本的微细电火花加工，需对电参数进行综合考虑。针对本实验的铝合金材料，在追求较高加工效率时，可适度提高峰值电流；而为了有效控制电极损耗、提高加工经济性，应避免使用过短的脉冲宽度，选择较宽的脉宽参数更为有利。

2.2 放电间隙的确定

采用微细电火花加工后铝工件的所得微孔的平均尺寸为 $0.35 \text{ mm} \times 0.16 \text{ mm}$ ，略大于所用矩形截面工具电极的平均尺寸（ $0.31 \text{ mm} \times 0.10 \text{ mm}$ ），这一尺寸差异主要由加工过程中的放电间隙所致。值得注意的是，孔形在矩形四个直角处均呈现不同程度的圆弧过渡，实测最小与最大圆角半径分别约为 $20 \mu\text{m}$ 与 $50 \mu\text{m}$ 。

此圆角现象主要是因为微细电火花加工过程中，工具电极的尖角部位电场集中、放电更为剧烈，导致该区域电极损耗速率显著高于其他部位，经长时间加工后，电极自身尖角被损耗为圆弧形，从而复刻到工件孔形上。另一个原因为铝合金材质较软，在放电热

作用下更易发生熔融与重凝,影响了棱边的锐利度,火花放电后表面质量较钢类材质差。此外,从实测尺寸反推可知,在电极宽度方向的单侧平均放电间隙约为 0.02 mm,而在长度方向约为 0.03 mm,这种间隙分布与放电的均匀性及排屑条件相关。

2.3 应用所选电参数进行微细结构样件加工

综合 3.1 与 3.2 节的工艺分析结果,并结合机床的实际加工能力,确定了用于深孔加工的参数:电极截面尺寸设定为 0.22 mm×0.35 mm(目标孔径为 0.279 mm×0.410 mm),峰值电流 3.25 A,脉冲宽度 8 μs,预设孔深为 4 mm。

实验发现,当电极进给至约 3 mm 深度时,出现明显的排屑困难,伴随加工不稳定及电极回退现象。其原因在于微细深孔加工中,孔径小、放电间隙狭窄(单侧间隙仅约 0.02~0.03 mm),导致电蚀产物难以及时排出。废屑在狭小间隙内逐渐积聚,阻塞了正常的放电通道,不仅降低了加工效率,严重时将导致短路、积碳拉弧,致使加工无法持续稳定进行。此外,深径比增大也加剧了电极的侧向损耗,进一步限制了可实现的孔径深宽比。

3 微细电火花加工材料蚀除过程的模拟分析

3.1 材料的蚀除机理

通过分子动力学仿真,已知铝的熔点与沸点分别为 933 K 与 2 333 K,在放电起始阶段,高能量密度的热源使作用区域温度急剧升高。当原子温度超过熔点(933 K)时,材料发生熔化。随着能量持续注入,局部温度进一步突破沸点(2 333 K),部分原子获得足够动能发生气化,并通过剧烈热膨胀以蒸气或微滴形式从熔池中飞溅脱离,形成材料去除的主要部分。放电结束后系统进入弛豫阶段,熔融材料在周围恒温层的快速冷却作用下重新凝固,最终在工件表面形成稳定的蚀除凹坑。值得注意的是,凹坑边缘两侧存在明显的材料堆积现象。这种材料堆积会直接影响已加工表面的粗糙度,还可能改变局部电场分布,对后续放电的稳定性产生干扰。

3.2 能量密度对蚀除过程的影响

高能量密度的电子流加热区域集中,使工件电极材料瞬间加热到高温并达到金属的熔点和沸点,在工件表面会形成熔融区。熔融区宽度随输入能量密度增加而呈近似线性扩大的规律。这表明,更高的能量密度导致更多原子发生相变并参与蚀除,单位时间内材料去除量随之增加。因此,从微观机理上证实,提高

脉冲能量(增大峰值电流或脉宽),能够提升微细电火花加工效率。

4 结束语

微细电火花加工技术目前已实现微槽的加工,加工零件的表面质量和尺寸精度达到预期目标。但深孔加工排屑仍然是限制加工孔深宽比的主要因素,进一步可以使用消边轴电极或阶梯轴电极进行微孔加工的试验研究。采用 MD 方法建立了微细电火花蚀除过程的三维 MD 仿真模型,从微观角度解释了单晶铝材料的蚀除机理,并研究了能量密度对熔融区宽度的影响。尽管模型的空间尺寸远小于实际电火花加工,但建立的模型能够定性地理解微细电火花的成形机理。未来将开展更大尺度的微细电火花 MD 模拟,研究电火花加工过程中表面粗糙度、表面变质层、残余应力等的变化规律。

参考文献:

- [1] Reynaerts D, Meeusen W, Van Brussel H. Machining of three-dimensional microstructures in silicon by electro-discharge machining[J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 1998,67(01-03):159-165.
- [2] 高长水,宋小中,刘正坝.电火花微细加工系统研制[J].机械科学与技术,1997,26(05):48-51.
- [3] 赵万生,李文卓,王振龙.高精度微细电火花加工系统的研制[J].电加工与模具,2004(01):6-8.
- [4] 李勇,王显军,郭旻,等.微细电火花加工关键技术研究[J].清华大学学报(自然科学版),1999,39(08):45-48.
- [5] 张玲瑄,贾振元,任小涛,等.微细电火花加工放电状态逐级映射检测[J].光学精密工程,2010,18(03):662-669.
- [6] Tong H, Li Y, Wang Y, et al. Servo scanning 3D micro-EDM based on macro/micro-dual-feed spindle[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(07-08):858-869.
- [7] 梁迎春,陈家轩,白清顺,等.纳米加工及纳构件力学特性的分子动力学模拟[J].金属学报,2008,44(08):937-942.
- [8] Shimada S, Tanaka H, Mohri N, et al. Molecular dynamics analysis of self-sharpening phenomenon of thin electrode in single discharge[J]. Journal of materials processing technology, 2004,149(01-03):358-362.
- [9] 崔景芝,王振龙.放电通道的微观模拟及其物理性能研究[J].电加工与模具,2007(01):13-16.
- [10] Yang X D, Guo J W, Chen X F, et al. Molecular dynamics simulation of the material removal mechanism in micro-EDM[J]. Precision Engineering, 2011,35(01):51-57.
- [11] Daw M S, Foiles S M, Baskes M I. The embedded-atom method: a review of theory and applications[J]. Material Science Reports, 1993,09(07-08):251-310.