

电液束多孔径制孔工艺参数影响规律研究

王占爽¹, 殷小龙², 刘金津¹, 吴宜洲¹, 韦志国¹, 王战玺^{1,2}, 刘维伟¹

(1.西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072; 2.陕西道博新材料科技有限公司, 陕西 西安 712000)

摘 要:电液束制孔具有表面质量高且无重铸层和微裂纹的优势,实际加工中关键工艺参数对加工孔径和质量影响显著。利用 COMSOL 软件对电液束制孔的动态成形过程进行仿真,分析加工电压、电解液电导率和进给速度等关键工艺参数对微小孔尺寸的影响;通过设计系列化制孔实验,成功实现了 0.5~1.0 mm 高精度直孔的加工。实验结果表明:孔径尺寸与加工电压和电解液电导率呈正相关,与进给速度呈负相关,通过优化工艺参数,最终获得了表面粗糙度达 1.28 μm 的高质量微小孔;当加工目标孔径与毛细管外径比值超过 1.8 倍时,将显著影响孔的几何精度(圆度和锥度),通过增大毛细管直径,目标孔的圆度得到明显提升。

关 键 词:电液束打孔;仿真分析;工艺参数;微小孔

中图分类号: TG662

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2025)06-1201-07

气膜冷却技术通过在涡轮叶片曲面设计 0.2~0.8 mm 微小孔,形成低温气膜来隔离高温气流,实现叶片保护^[1]。目前,圆柱形气膜孔已被广泛应用于涡轮叶片中,显著提高了叶片的强度与使用寿命^[2]。随着微小孔加工技术不断地研究和发展,特种加工在气膜孔加工领域具有明显的优势,得到了广泛的应用^[3]。使用电火花制孔技术加工深孔时孔壁表面不可避免地会形成重铸层,重铸层中可能存在气孔等缺陷。激光加工虽然加工速度更快、材料去除率更高,但其热影响区较大,容易产生背伤、孔内表面重熔层和孔锥度等缺陷,导致孔表面完整性较差。

电液束加工是一种基于金属管电极开发的新电解技术,其主要用于微小孔的高效加工。这种方法能够一次性完成孔的加工,且加工表面质量高,无微裂纹和热再铸层。美国 GE 公司已具备加工直径 0.2~0.8 mm、深径比大于 50~300 的制孔能力^[2]。德国开姆尼茨理工大学的 Hackert-Oschaetzchen

等^[4]运用电液束技术对硬质合金进行了研究,并成功加工出了微细孔结构,质量表现出色。波兰华沙工业大学的 Kozak 等^[5]通过研究电液束打孔技术,提出了加工参数与材料去除率之间关系的数学模型,进一步分析了射流中电场分布及电导率变化对加工性能的具体影响。自 20 世纪 80 年代开始,北京航空制造技术研究院就着手研究电液束加工技术,攻克了多项关键难题。张明岐等^[6]为了进一步提高航空发动机涡轮叶片气膜孔加工效率,对多工位电液束加工技术进行了研究。潘志福等^[7]针对电液束加工中出现的多种典型孔口缺陷,基于加工电压、电解液浓度、进给速度等参数提出了一套优化工艺的控制方法以有效改善加工质量。南京航空航天大学冯瑞、房晓龙等^[8-10]将弹性熔融石英毛细管作为阴极工具,设计了微细电解加工平台,研究电极直径、加工电压等参数,实现了微细电解车削、铣削、微小凹坑及微小孔的制备。大连理工大学于文涛^[11]建立了基于数控平台的电液束加工装置,并对电液束加工过程中的电场进行了有限元分析,得出了工件表面加工区域内的电流密度分布情况。

本研究在电液束加工工艺研究、仿真建模及参数优化的基础上,以电解加工基本原理和气流两相流理论为指导,利用 COMSOL 软件对电液束微小孔的动态成形过程进行仿真,验证了多物理场结合仿

收稿日期:2025-02-19

基金项目:陕西省技术创新引导专项(2024CG-CGZH-23)、西安市科技计划(23KGDW0029-2022)与陕西省技术创新引导计划(2023KXJ-176)资助

作者简介:王占爽(2000—),硕士研究生

通信作者:刘维伟(1970—),研究员 e-mail:liuww@nwpu.edu.cn

真模型的可行性。此外,基于工业机器人平台搭建电液束加工系统,开展微小孔电液束加工试验研究。

1 电液束加工原理及仿真分析

1.1 电液束加工基本原理

电液束加工原理如图 1 所示,作为金属管电极电解加工技术的延伸,是一种专门用于制造微小孔的先进方法。在此过程中,电解液与高电压相结合,通过特定的机制被“激活”或“阴极化”。随后,这股被高度活化的电解液流在绝缘喷嘴引导下,以极高的速度冲击工件表面。在电化学阳极溶解效应与化学加工辅助作用的共同作用下,工件材料被迅速且精确地溶解,从而实现了对微小孔的高效加工。简而言之,电液束加工利用高压酸性电解液的高速喷射和电化学溶解原理,在工件上精确打孔。

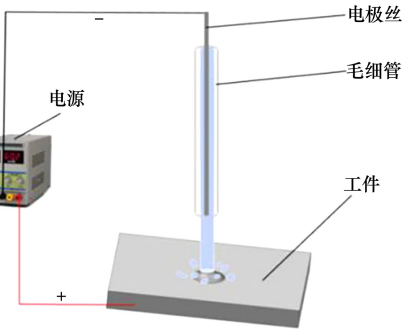


图 1 电液束加工原理示意图

1.2 仿真模型建立

COMSOL Multiphysics 是一款基于有限元方法 (FEM) 的强大多物理场仿真软件,被广泛应用在各种电解加工和微孔加工的仿真分析中。本文基于 COMSOL 构建了如图 2 所示的电液束打孔二维轴对称模型,并进行区域划分。其中 I 为工具阴极、II 为毛细玻璃管、III~VI 为电解液流动区域。阴极直径为 d ,玻璃管内径为 D ,玻璃管壁厚为 T 。本文的流体域模型结构相对规则,计算量适中,按照流体域和非流体域分别采用不同尺寸的自由三角形网格划分。对所有壁面区域的边界设置边界层,对所有尖角处进行网格加密。此外,工件表面(即边界 8)变形是本研究的重点,因此需要对工件表面的边界层进行网格加密,以提高计算精度。图 3 为网格划分图。

在电液束加工中,影响加工精度与稳定性的不

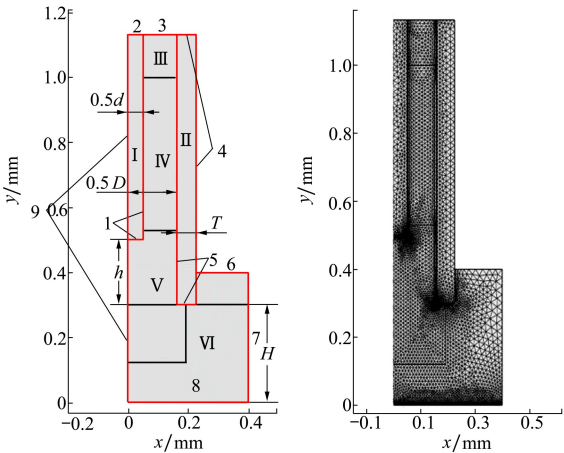


图 2 仿真模型区域划分 图 3 网格划分图

仅是单一的电场、流场或结构场,还需要重点关注这些物理场之间的耦合关系。在冷却孔电解期间,高效流动的电解液可迅速去除加工间隙中的热量与气体,加工间隙中存在氢气以及少量因阳极溶解产生的金属颗粒。加工间隙中的介质包括气态、液态和固态的三相流。但这些金属颗粒对电解液电导率及工件表面的电流密度影响甚微,可忽略不计。所以,可将加工间隙内的三相流问题简化为气-液两相流来处理。在电解加工过程中,间隙电场形成了一个稳定的电场,假设此电场的参数仅为空间位置依赖,则其电位分布可通过拉普拉斯方程来表述。本文采用“电流”、“两相流,水平集”和“移动网格”模块,来描述加工过程中的电场、流场分布以及微小孔成形过程。表 1~2 分别为电流模块和气液两相流模块边界条件设置。

表 1 电流模块边界条件设置

设置	边界或域	条件
电流守恒 1	I	阴极,电压为 0 V
电流守恒 2	III, IV, V, VI	设置电导率为自定义函数 $\kappa = \kappa_0 \beta_1 + \kappa_a (1 - \beta_0)$
电势	8	阳极工件表面,电压为 U_0
初始值	III, IV, V, VI	设置初始电势为 0 V

表 2 气液两相流模块边界条件设置

设置	边界或域	条件
入口	3	平均速度 V_{avg}
出口	6, 7	设置静压 0 Pa, 抑制回流
初始值 1	III, IV	流体 1 (电解液), 流速初始值为 0 m/s;
初始值 2	V, VI	流体 2 (空气), 流速初始值为 0 m/s;
湿润壁	8	接触角 $\theta_w = \pi/2$

在实际加工中,高速带电射流通过电化学作用蚀除金属材料,在加工区域形成凹坑。在仿真中,通过设置边界 8 的变形速度,可以模拟出工件表面材料的去除情况。工件表面变形速度参照德国学者 Hackert-Oschätzchen 等^[12]在进行射流电解加工仿真时,基于法拉第定律,对加工表面的变形速度 V_n 进行定义,即

$$V_n = \eta \frac{M}{Z_A \rho F} n i_n$$

式中: η 为电流效率,无量纲单位; M 为工件材料的相对分子质量,无量纲单位; Z_A 为相对化合价,无量纲单位; ρ_m 为材料密度, kg/m^3 ; F 为法拉第常数; n 为单位向量; i_n 为加工区域的电流密度, A/mm^2 。

1.3 仿真结果

根据 1.2 节所建立的电液束加工微小孔动态成形仿真模型。将加工电压、电解液电导率、电极进给速度和入口流速作为输入条件,模拟电液束加工微小孔的成形过程。其余边界条件设置如表 3 所示。

表 3 流场、电场仿真分析边界条件

参数	数值
加工电压 U_0/V	45
电极进给速度 $V_y/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	0.6
电解液电导率 $\kappa_e/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	10
电解液入口流速 $V_{\text{avg}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	10
玻璃管内径/mm	0.32
玻璃管外径/mm	0.45
初始间隙 H/mm	0.3
电极丝到玻璃管口的距离 h/mm	0.2

图 4 展示了不同时刻加工区域流线图,颜色变化反映了流速的大小。由图 4 可知,电解液的最大流速出现在电极底面靠近微小孔出口的位置,而最小流速出现在电极底部中心附近,这不利于工件表面电解液的更新。通过调节毛细玻璃管阴极的几何尺寸(如直径参数)和入口液压参数,可有效调控流体域内工作液的流速分布特性。仿真结果表明,增大进口流量能够显著抑制加工过程中的非均匀蚀除现象,进而提升加工精度,改善表面粗糙度。

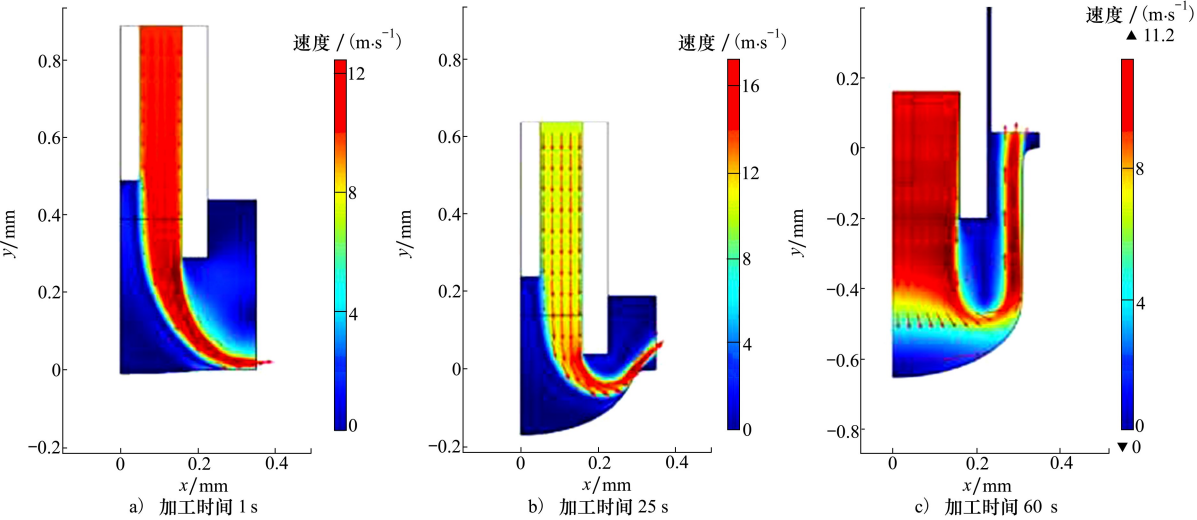


图 4 流体域流线和速度分布图

图 5 展示了不同时刻加工区域电场分布。加工时间 1 s 时,侧壁电流密度的增加能够加快侧壁材料的溶解速度,有助于形成更加垂直的侧壁形貌,并导致电解液产生反射现象。25 s 时,电解液不再沿工件表面流动,而是直接射向空气中,使加工区域以外的表面停止电化学反应。60 s 时,电极的进给速

度与工件的阳极溶解速度趋于一致,电极底部与孔底部的距离基本保持不变,孔底部电流密度趋于稳定。与此同时,由于毛细管下端面以上的孔侧壁及孔口区域受限于管与空气相的绝缘性,几乎不再受电流影响。

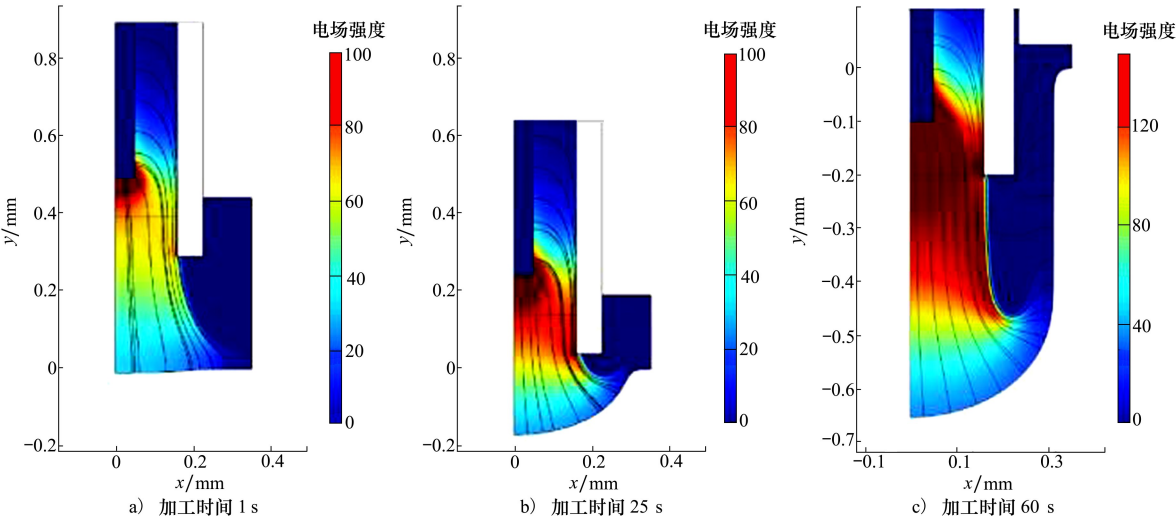


图 5 加工区域电场分布图

1.4 工艺参数影响规律

设置仿真条件:在保持其他参数条件不变的情况下,分别采用加工电压为 30,40,50,60 和 70 V 进行加工。

从图 6 可以看出,随着加工电压的增大,微小孔的均值半径逐渐增大。当加工电压从 30 V 增加至 70 V 时,微小孔的平均半径由 0.300 增加至 0.349。这是因为在加工过程中,加工电压与微小孔形成有着紧密的联系。当加工电压增大时,工件表面的电流密度随之提升,这使得达到蚀除电流密度阈值的区域范围不断扩大。最终,更多区域满足蚀除条件,

从而形成更大尺寸的微小孔。

图 7~8 分别展示了仅改变电解液电导率和进给速度时微小孔均值半径的变化规律。图 7 表明微小孔半径与电解液电导率呈正相关,图 8 表明微小孔半径与进给速度呈负相关。这是因为电解液电导率升高会导致溶液电阻降低,提升加工回路中的电流值,加快工件阳极的溶解速度,扩大侧面加工间隙并最终增大孔径。进给速度越快,则电极深入成形孔所需的时间就越短,加工状态过早趋于稳定,导致孔侧壁加工不到位,加工孔径小于期望值。

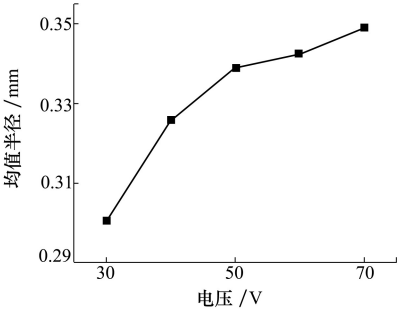


图 6 加工电压对微小孔均值半径的影响

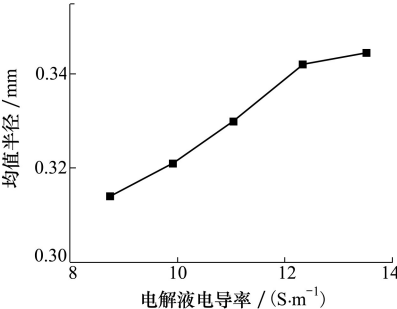


图 7 电解液电导率对微小孔均值半径的影响

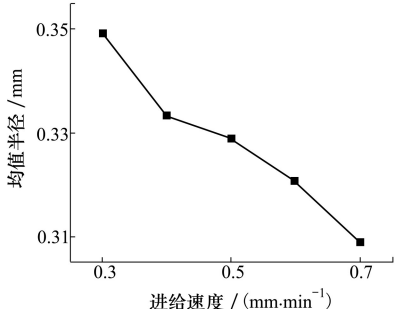


图 8 进给速度对微小孔均值半径的影响

2 电液束加工工艺实验

2.1 实验平台搭建

为探究镍基高温合金电液束制孔的高效率、高

质量加工工艺参数,搭建的电液束加工系统如图 9 所示,本研究采用第二代镍基单晶高温合金 DD6 材料,根据实验要求采用线切割方式将试样切割成厚度为 2 mm 和 5 mm 的平板试样。其主要的元素组成及含量如表 4 所示。

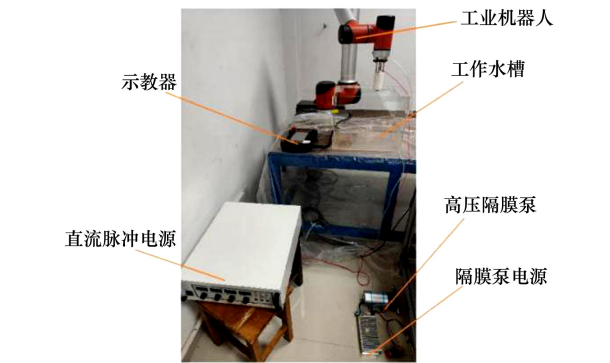


图 9 电液束加工实验设备

表 4 镍基合金 DD6 元素含量 %				
w_{Ni}	w_{Al}	w_{Ta}	w_W	w_{Co}
余量	5.2~6.2	6.0~8.5	7.0~9.0	8.5~9.5
w_{Re}	w_{Hf}	w_{Cr}	w_{Mo}	
1.6~2.4	0.05~0.15	3.8~4.8	1.5~2.5	

2.2 不同孔径大小制孔实验研究

针对孔径范围为 0.5~1 mm 的气膜孔进行了制孔实验。所有气膜孔均采用内径为 0.32 mm、外径为 0.45 mm 的毛细管和直径为 0.1 mm 的铂丝进行加工,加工孔深 5 mm。加工参数:加工电压 38 V、进给速度 0.48 mm/min、电解液压力 1 MPa、电解液电导率 9.9 S/m。采用光学三维扫描仪对加工小孔的孔径和圆度进行测量。表 5 展示了加工后的微小孔形貌数据,表明孔径大小符合加工要求。

表 5 不同孔径的微小孔尺寸				
序号	孔径/mm	锥度/°	入口圆度 $\Phi_1/\mu\text{m}$	出口圆度 $\Phi_2/\mu\text{m}$
1	0.504 8	0.765 83	36.4	15.6
2	0.608 4	0.827 92	39.0	45.5
3	0.702 4	0.562 31	48.6	19.1
4	0.777 0	0.583 96	65.1	42.9
5	0.906 4	1.498 16	108.2	163.4
6	1.018 4	1.595 68	54.1	122.1

获得孔的尺寸及出入口形貌如图 10 所示。对不同孔径的出入口圆度及锥度进行了分析,如图 11 所示。可见,孔径对加工质量的影响较大。随着孔径的增大,孔入口圆度呈增大的趋势;当孔径较小时,孔出口圆度变化不明显,但当孔径达到0.9 mm 后,出入口圆度变化显著,尤其是孔出口形状明显不

规则。此外,孔锥度在孔径达到 0.9 mm 后也明显增大。

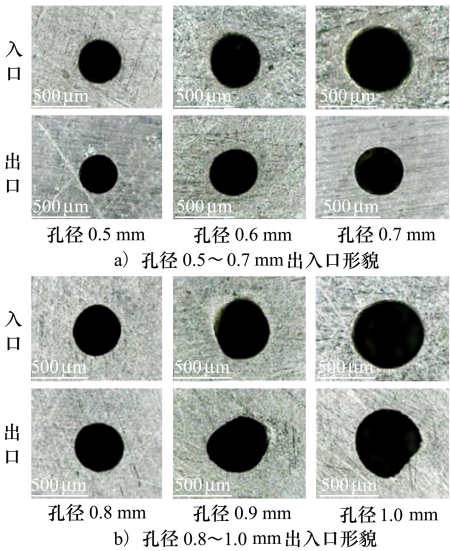


图 10 不同孔径大小的孔出入口表面形貌及尺寸

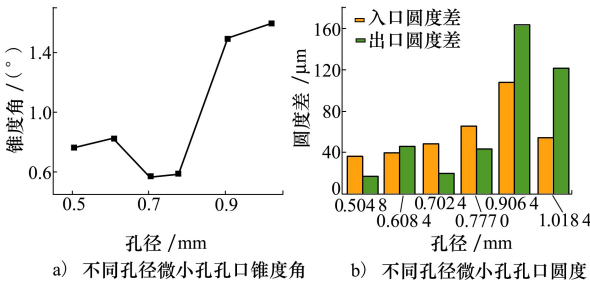


图 11 不同孔径的微小孔孔口圆度和锥度角

分析表明,当使用相同尺寸的铂丝和毛细管加工不同孔径的气膜孔时,如果孔径显著大于毛细管尺寸,入口及孔中段的加工可以正常进行。然而,由于孔径远大于毛细管尺寸,可能在出口处的圆度尚未形成之前便已完全穿透。这时,射出的液束可能无法与孔出口充分接触,从而导致加工停止,进而使得孔的出入口形貌差异显著,出口的圆度较差,并且出入口之间的尺寸差距较大,锥度角也增加。因此,为了确保孔的加工质量,应避免孔径与所用玻璃管外径之间的比值过大,经验建议不应超过 1.8 倍。在加工孔径较大的气膜孔时,可以通过增大毛笔玻璃管外径和铂丝直径来减小比值,从而获得加工质量更好的小孔。图 12 为采用内径 0.53 mm、外径 0.67 mm 的毛细玻璃管和直径 0.15 mm 的铂丝加工出的直径 0.9 mm 微小孔。与之前相比,该孔的圆度明显提升。

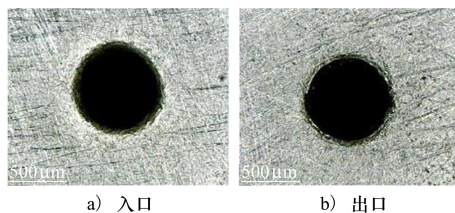


图 12 增加电极尺寸后加工的 0.9 mm 微小孔

如图 13 所示,使用光学 3D 测量仪对孔壁进行扫描,可以观察到孔侧壁较为光滑,表面粗糙度测量

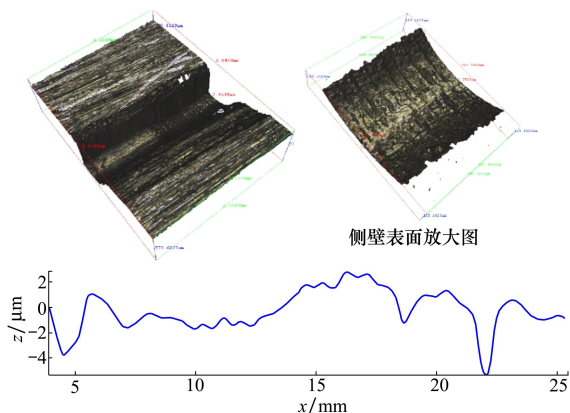


图 13 孔侧壁三维形貌扫描图

结果为:轮廓算术平均偏差 $1.283\ 8\ \mu\text{m}$,轮廓均方根偏差 $1.597\ 1\ \mu\text{m}$,轮廓最大高度 $4.089\ 3\ \mu\text{m}$ 。

3 结 论

本文通过仿真分析微小孔动态成形过程,探究工艺参数对孔径的影响规律,使用电液束技术对镍基单晶 DD6 合金试样进行加工实验,测量并分析加工后微小孔的形貌变化规律,探索不同孔径微小孔加工工艺,为实际工艺生产加工提供理论指导。主要结论如下:

1) 在电液束加工过程中,微小孔的平均孔径会随加工电压和电解液电导率的增加而增大;随着进给速度的加快而减小。优化参数,在加工电压 38 V、进给速度 0.48 mm/min、电解液压力 1 MPa、电解液电导率 9.9 S/m 的条件下成功加工出形貌良好的 0.5~1.0 mm 的直孔,表面粗糙度达到 $1.28\ \mu\text{m}$ 。

2) 当目标孔径增大时,孔口的圆度误差逐渐增大,当加工目标孔径与毛细管外径比值超过 1.8 倍时,会显著影响孔的圆度和锥度。通过增大毛细管直径,目标孔的圆度得到明显提升。

参考文献:

- BIANCHINI C, FACCHINI B, MANGANI L, et al. Heat transfer performances of fan-shaped film cooling holes, Part II-Numerical analysis[C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo, 2010: 1573-1583
- 李世峰, 黄康, 马护生, 等. 航空发动机涡轮叶片气膜冷却孔设计与制备技术研究进展[J]. 热能动力工程, 2022, 37(9): 1-11
LI Shifeng, HUANG Kang, MA Husheng, et al. Research progress on design and manufacture technologies of film coolinghole for aeroengine turbine blade[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(9): 1-11 (in Chinese)
- 刘新灵, 陶春虎, 刘春江, 等. 航空发动机叶片气膜孔加工方法及其演变分析[J]. 材料导报, 2013, 27(21): 117-120
LIU Xinling, TAO Chunhu, LIU Chunjiang, et al. Investigation of processing methods and development of gas holes of engine blade[J]. Materials Review, 2013, 27(21): 117-120 (in Chinese)
- HACKERT-OSCHÄTZCHEN M, MEICHSNER G, ZINECKER M, et al. Micro machining with continuous electrolytic free jet[J]. Precision Engineering, 2012, 36(4): 612-619
- 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(4): 490-498
- 张明岐, 潘志福, 傅军英, 等. 多工位电液束加工技术[J]. 航空制造技术, 2021, 64(9): 22-29
ZHANG Mingqi, PAN Zhifu, FU Junying, et al. Electro stream machining technology of multi-station[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(9): 22-29 (in Chinese)
- 潘志福, 傅军英, 张明岐. 电液束加工特性及小孔形貌控制技术研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(4): 14-20
PAN Zhifu, FU Junying, ZHANG Mingqi. Study on characteristics of electro stream machining and controlling technology of hole morphology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(4): 14-20 (in Chinese)
- 冯瑞. 射流电解铣削加工技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021

FENG Rui. Research on machining technology of jet electrolytic milling[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021 (in Chinese)

[9] 贾继欣. 基于盐溶液的微小孔电液束加工技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011

JIA Jixin. Research on the machining of micro-holes by electrolytestream drilling based on sodium nitrate[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011 (in Chinese)

[10] 房晓龙. 管电极电解加工关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013

FANG Xiaolong. Research on key techniques of shaped tube electrochemical machining[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013 (in Chinese)

[11] 于文涛. 电液束加工微小结构试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013

YU Wentao. Experimental research on manufacturing of tiny structures by electrolyte jet machining[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013 (in Chinese)

[12] HACKERT-OSCHÄTZCHEN M, PAUL R, MARTIN A, et al. Study on the dynamic generation of the jet shape in Jet electrochemical machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 223: 240-251

Study on influencing law of processing parameters in multi-aperture hole-making process with electro-hydraulic jet

WANG Zhanshuang¹, YIN Xiaolong², LIU Jinjin¹, WU Yizhou¹,
WEI Zhiguo¹, WANG Zhanxi^{1,2}, LIU Weiwei¹

(1.School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.Shaanxi Daobo Advanced Materials Science and Technology Co., Ltd., Xi'an 712000, China)

Abstract: Electro-hydraulic drilling has the advantages of high surface quality and no recast layer or microcracks. In the drilling, the optimization of the processing parameters has a significant influence on the hole diameter and quality. In this paper, the dynamic processing process of electro-hydraulic drilling is simulated and analyzed by using COMSOL software. The influences of the key processing parameters such as voltage, electrolyte conductivity and feed rate on the size of micro-holes are analyzed. Through the design of a set of drilling experiments, the high-precision straight holes with the diameters ranging from 0.5 mm to 1.0 mm were successfully drilled. The experimental results show that the hole diameter is positively correlated with the voltage and electrolyte conductivity, and negatively correlated with the feed rate. By optimizing the processing parameters, the high-quality micro-holes with a surface roughness of 1.28 μm were obtained. When the ratio of the target hole diameter to the outer diameter of the capillary exceeds 1.8 times, it will significantly affect the geometric accuracy (roundness and taper) of the hole. By increasing the diameter of the capillary, the roundness of the target hole is greatly improved.

Keywords: electro-hydraulic beam punching; simulation analysis; processing parameters; micropore

引用格式:王占爽, 殷小龙, 刘金津, 等. 电液束多孔径制孔工艺参数影响规律研究[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(6): 1201-1207

WANG Zhanshuang, YIN Xiaolong, LIU Jinjin, et al. Study on influencing law of processing parameters in multi-aperture hole-making process with electro-hydraulic jet[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2025, 43(6): 1201-1207 (in Chinese)