

文章编号 1004-924X(2023)12-1774-11

安全滤网阵列网孔激光—电解组合加工

葛声宏^{1,2}, 申继文¹, 曾永彬^{1*}

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;
2. 中航工业南京伺服控制系统有限公司, 江苏 南京 210061)

摘要:安全滤网阵列网孔的高效、高品质和高适应性加工至今仍面临重大技术挑战。基于此,提出采用激光-电解组合加工技术制备安全滤网阵列网孔结构。介绍了激光-电解组合加工技术的试验加工系统,探究了工艺参数对微孔形貌质量和加工精度的影响规律,并开展了安全滤网阵列网孔的制备。试验结果表明:激光加工路径显著影响微孔出口的形貌,采用同心圆轨迹(外径 270 μm ,内径 230 μm ,线间距 2.5 μm)能够显著改善微孔出口的圆度;激光功率越大、切割速度越小,微孔直径及其热影响区均越来越大; NaNO_3 -乙二醇溶液作为电解抛光液能够在加工表面形成扩散层发生电解抛光,将激光加工产生的喷溅物和毛刺等缺陷去除;基于优化工艺参数,加工出 253 个直径 0.31 mm 的阵列网孔结构,出入口直径方差仅为 2.02 和 1.71,展示出较高的尺寸一致性。激光-电解组合加工技术在薄壁件上高效、高品质制备阵列网孔结构方面具有很强工艺能力和发展潜力。

关键词:组合加工;激光加工;电解加工;安全滤网;阵列网孔

中图分类号: TG665;TG662 **文献标识码:** A **doi:** 10.3718/OPE.20233112.1774

Laser-electrochemical combined machining for micro-hole arrays of safety filter

GE Shenghong^{1,2}, SHEN Jiwen¹, ZENG Yongbin^{1*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AVIC Nanjing Servo Control System Co., Ltd. Nanjing 210016, China)

* Corresponding author, E-mail: binyz@nuaa.edu.cn

Abstract: Highly effective and adaptable fabrication of high-quality micro-hole arrays for safety filters remains challenging. Therefore, in this study, a combination of laser and electrochemical machining technology was developed for preparing micro-hole arrays for safety filters. An experimental processing system for laser - electrochemical combined machining was devised, the effects of process parameters on the processing quality were investigated, and a safety filter sample was prepared. The results indicated that in the laser processing, the laser cutting path significantly affects the outer shape of the through-hole, and the outer roundness of the through-hole can be significantly improved using the optimized concentric circle path (outer diameter: 270 μm , inner diameter: 230 μm , and spacing distance: 5 μm). A higher laser power

收稿日期:2022-12-24;修订日期:2023-01-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52175413);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. NP2022422);江苏省自然科学基金资助项目(No. BK20222010)

and lower cutting speed correspond to a larger through-hole diameter and heat-affected zone. NaNO_3 -ethylene glycol solution as polishing electrolyte can form a diffusion layer on the machining surface for electrolytic polishing and remove the spatters and burrs generated by laser processing. Using the optimized process parameters, 253 micro-hole structures with a diameter of 0.31 mm were machined, and the variance of the inlet and outlet diameters was only 2.02 and 1.71, respectively, indicating a high dimensional consistency. The laser-electrochemical combined process has considerable potential for the fabrication of high-quality micro-hole arrays on thin-walled workpieces.

Key words: combined machining; laser machining; electrochemical machining; safety filter; micro-hole arrays

1 引言

液压系统凭借高能量和高精确性广泛用于飞机控制起落架、航天器襟翼、方向舵和制动器的驱动^[1-2]。但液压系统中无一例外存在大颗粒污染物,它们来自于零件表面残留的碎屑、Teflon胶带、焊接时的焊屑、O型圈的碎片、零件磨损的颗粒和故障部件的碎片等^[3]。在飞机的液压系统中,许多敏感元器件诸如单向阀、节流阀和安全阀等对上述的大颗粒污染物几乎没有防护能力。此外,这些零部件通常安装在维修难以接触的位置,如果发生故障会导致大量高成本的停机时间。在节流阀和单向阀中安装安全滤网是一种提高它们对大颗粒污染物的防护能力、减免故障发生的有效途径^[4]。安全滤网网板外径为7.2 mm,壁厚为0.15 mm,常用网孔直径为0.1 mm, 0.2 mm和0.3 mm,对应的孔数分别为1 500, 700和250。以某型号安全滤网为例,其入口直径和出口直径分别为 (0.31 ± 0.008) mm和 (0.27 ± 0.008) mm、孔数为253个、孔间距为 (0.44 ± 0.01) mm。此外,安全滤网在被污染物部分或完全堵塞时需要具有一定的承压能力,其上微小的缺陷在高压流体的不断冲刷下会严重影响工作性能和使用寿命,因此加工后的网孔不能有翻边、毛刺和残余应力等缺陷。在薄壁件上加工出成百上千个小孔,需要确保单孔的高圆度和高加工质量,还要保障阵列微孔具有较高的尺寸一致性,同时又要兼顾加工效率,这对阵列群孔加工提出了极大的挑战,亟需开展薄壁件阵列群孔的高效、高质量加工研究。

目前,薄壁件阵列微孔的加工技术主要有:机械加工、特种加工和复合加工。机械加工主要

包括机械钻削和机械冲压,但其存在微钻头/群冲头制造困难、刚度差、排屑困难、孔两端都有毛刺和残余应力等不足^[5-6]。弯艳玲等^[7]基于高速钻削技术加工出直径0.2 mm的阵列微孔,但孔的出入口均存在毛刺。特种加工主要包括微细电火花加工、微细电解加工、电子束加工和激光加工。微细电火花加工包括两种方法:电火花穿孔和高速电火花小孔加工。电火花穿孔加工需要先制备阵列电极,研究人员先后提出线电极电火花磨削^[8]、微细线切割^[9]、电极反铸^[10]等制备方法。翁明浩等^[11]采用反铸法制备出 5×5 阵列电极并采用该电极电火花加工出直径0.04 mm的阵列微孔。高速电火花小孔加工采用中空金属管作为工具电极,电极内部通入高压工作液并施加旋转,其可完成直径0.3~3 mm小孔的高速加工,深径比可达200:1^[12]。但加工表面存在重铸层和微裂纹等缺陷。微细电解加工主要包括:掩膜电解加工和管电极电解加工。曲宁松等^[13-14]采用PDMS柔性活动掩膜在平面和曲面上均加工出高尺寸一致性的阵列微结构。但是单面掩膜电解加工出的小孔深径比通常低于30%,双面掩膜电解加工又存在掩膜孔对中问题。管电极电解加工时工具电极持续进给,能够加工出大深径比小孔结构。研究人员从优化电场分布^[15]、流场分布^[16]、改善供液方式^[17]以及采用阵列群管电极^[18]等方式进一步增强管电极电解加工的工艺能力。王维等^[19]通过优化电解液分配腔,一次性可加工出100个孔径1 mm的阵列排孔。但是管电极电解加工过程中的杂散腐蚀和过切问题需要进一步解决。电子束加工速度快,没有宏观应力和变形,能够加工任何脆性、导体和半导体等材料,但其需要真空环境,加工成本很高^[20]。相

比之下,激光加工可在室内环境进行,打孔速度高,成本低,且不受材料限制,适用于海量阵列群孔的加工^[21]。常规激光加工后的表面有重铸层缺陷,为此飞秒激光技术^[22]、水导激光技术^[23]等应运而生。德国汉诺威激光中心^[24]采用飞秒激光技术在 1 mm 不锈钢板上加工出直径 0.1 mm 的微孔。飞秒激光和水导激光可获得无重铸层加工面,但飞秒激光加工效率低且成本较高,不适用阵列群孔的加工,而水导激光在激光耦合过程中能量损耗严重,加工效率也较低。近年来,加工技术之间的相互组合/复合成为加工技术未来发展的一个趋势。常用阵列微孔的复合加工技术包括激光-电液束复合加工^[25]和电火花-电解复合加工技术^[26]等。余毅权^[27]通过激光-电液束复合加工技术在 0.2 mm 不锈钢片上制造出直径 0.62 mm 的阵列群孔结构,加工后的通孔侧壁无重铸层和微裂纹等缺陷。张彦等^[28]基于电火花-电解复合加工技术实现高温合金材料上孔径 0.5 mm 的无重铸层小孔的制备。

然而,现有的薄壁件阵列微孔加工技术仍不能兼顾高效、高质量和高适应性。机械加工的刀具与工件直接接触,易造成微孔和滤网本体的变形,而单独的激光工艺和电火花工艺加工后的表面又有重铸层缺陷,虽然电解加工的表面无重铸层缺陷,但是受限于工具电极尺寸或者微结构深径比的制约,现有复合技术尚处于基础研究阶段,到工程应用还有一定距离。基于此,本文提出采用激光-电解组合加工技术制备安全滤网阵列网孔结构,将现有成熟的激光工艺与电解工艺相结合,优势互补,以期实现安全滤网阵列网孔结构的高效、高质量加工。本文将对激光-电解组合加工技术的加工系统、工艺参数的影响规律以及安全滤网阵列网孔的加工效果进行分析和研究。

2 激光-电解组合加工试验

2.1 试验系统

激光-电解组合加工首先采用激光束对工件材料进行加工,等到激光加工结束后,再进行电解抛光加工,通过电化学作用去除激光加工产生的重铸层、微裂纹及热影响区等缺陷,提高滤网微孔的表面质量。皮秒激光微加工系统是由皮

秒激光器、光路系统、激光振镜、CCD 显微镜监测系统、精密位移平台等构成,如图 1 所示。通过激光光路装置和扫描振镜可以将激光器发出的激光束传导并聚焦到需要烧蚀的工件上,通过扩束镜和振镜场镜的匹配以调节激光聚焦尺寸,将焦点半径控制在微米量级,以实现微米级结构的精密加工。通过采用高定位精度的三轴电动位移平台和自行设计的夹具来精确控制工件的位移从而实现群孔的精确激光加工成型。

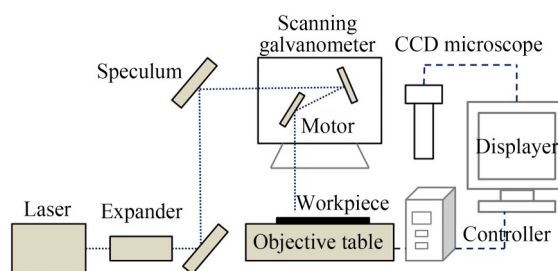


图 1 皮秒激光加工系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of picosecond laser processing system

秒激光加工系统是由皮秒激光器、光路系统、激光振镜、CCD 显微镜监测系统、精密位移平台等构成,如图 1 所示。通过激光光路装置和扫描振镜可以将激光器发出的激光束传导并聚焦到需要烧蚀的工件上,通过扩束镜和振镜场镜的匹配以调节激光聚焦尺寸,将焦点半径控制在微米量级,以实现微米级结构的精密加工。通过采用高定位精度的三轴电动位移平台和自行设计的夹具来精确控制工件的位移从而实现群孔的精确激光加工成型。

电解抛光是一种基于阳极电化学溶解原理在阳极表面微观凸起部分发生选择性溶解以形成平滑表面的工艺方法。电解抛光加工系统主要由电解电源、工件、阴极、电解槽、恒温加热台等组成,如图 2 所示。两个平板阴极对称分布在工件的两侧,对工件的正反面同时加工,工件和阴极分别外接电解电源的正极和负极,恒温加热

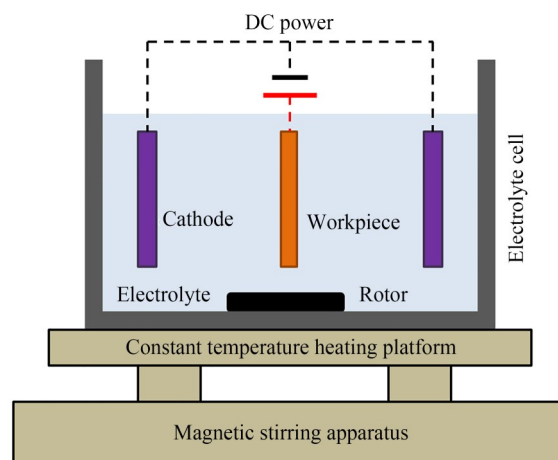


图 2 电解抛光系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electrochemical polishing system

台保持电解液始终处于 50 ℃,以保证电解抛光效果^[29]。

2.2 试验条件

试验材料选用 SUS304L 不锈钢片(长度 10×宽度 50×厚度 0.5 mm)作为工件。试验中的皮秒激光器为德国 Edgewave 公司的 PX 系列超短脉冲激光器,场镜焦距 100 mm,波长为 532 nm,脉宽为 10 ps,焦点半径为 10 μm,光束质量 $M^2<1.3$,最大重复频率达 600 kHz,平均输出功率为 40 W,最大单脉冲能量达到 200 μJ。电解抛光电源为直流电源(型号 IT6122,艾德克斯电子(南京)有限公司),在恒电压模式下进行电解抛光。试验所用工艺条件及电解抛光液如表 1 所示。所有化学试剂均为分析纯。

表 1 主要试验条件及参数

Tab. 1 Main experimental conditions and parameters

Parameter	Value
Laser power/W	1. 2、1. 64、2. 08、2. 52、2. 96、3. 4
Cutting speed/(mm·s ⁻¹)	4, 6, 8, 10, 12, 14
Defocusing amount/mm	-0. 15, -0. 1, -0. 05, 0, 0. 05, 0. 1
Electrolyte	NaNO ₃ -ethylene glycol
Conductivity/(mS·cm ⁻¹)	3
Temperature/℃	50
Machining gap/mm	30
Machining Voltage/V	35, 40, 45, 50, 55, 60

3 结果与分析

3.1 加工路径对微孔成型的影响

激光加工微孔结构时,微孔的入口和出口通常存在较大的差异。微孔的入口圆度较高,而出口圆度较低(呈椭圆形),且出口的椭圆度随着加工深度和材料厚度的增加愈发明显^[21]。其原因是线偏振光切割的效率是随着光束偏振方向和切割方向之间的夹角的不同而发生变化,当偏振方向和切割方向一致时,切割的效率最高,当偏振的方向和切割的方向垂直时,切割的效率最低,所以在两个垂直的方向呈现出椭圆的长轴和短轴;此外,随着材料厚度增加,光能不断被侧壁吸收和损耗,微孔出口越来越小,侧壁吸收越来越

越多,而垂直方向的切割效率逐渐降低至极限,导致椭圆度越来越大。为获得高圆度的微孔出入口,首先进行激光加工路径的优化。

在激光功率 2. 52 W,切割速度从 8 mm/s,离焦量-0. 1 mm 的条件下,探究了激光加工路径对微孔成型的影响。图 3 所示为不同加工路径下微孔出入口形貌的变化。如图所示,激光加工路径对微孔入口的形貌影响较小,但显著影响微孔出口的形貌。在激光加工路径为单向直线、双向直线和射线时,微孔出口均呈现椭圆状且边界为锯齿结构、圆度很差,如图 3(a)~3(c)所示;而当激光加工路径为同心圆时,微孔出口圆度较高且无锯齿状结构,出口圆度较高,如图 3(d)所示。

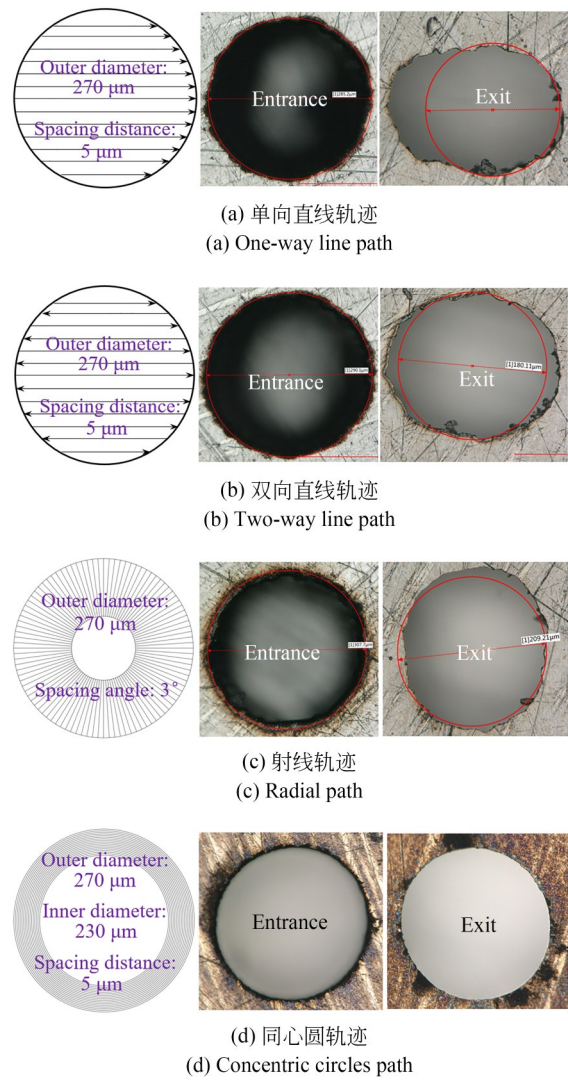


图 3 不同激光加工轨迹下微孔出入口形貌图

Fig. 3 Inlet and outlet morphology of micro-hole under different laser processing paths

不同加工路径下微孔出入口尺寸的变化如图 4 所示。在四种不同的激光加工路径下,微孔的入口直径发生小幅度变化,从 $285.2\ \mu\text{m}$ 增加到 $312.1\ \mu\text{m}$;而微孔的出口直径发生显著变化,从 $135.9\ \mu\text{m}$ 增加到 $275.3\ \mu\text{m}$ 。经过上述结果对比发现:采用外圆 $270\ \mu\text{m}$ 、内圆 $230\ \mu\text{m}$ 、线间距 $5\ \mu\text{m}$ 的同心圆轨迹能够有效改善激光加工微孔出口圆度较低的问题,提高激光钻孔的加工精度。

3.2 加工功率对微孔成形的影响

在打标速度为 $8\ \text{mm/s}$ 、离焦量为 $-0.1\ \text{mm}$ 的条件下,探究了激光加工功率对微孔成形的影响。如图 5(a)~5(f)所示,随着激光功率的增大,微孔入口的边缘圆滑度明显变好,但微孔边缘喷溅的加工产物也逐渐增多。这是因为激光功率越大,产生的能量越高,材料蚀除量速度越快,因此微孔入口边缘圆滑度更好,但同时加工产生的蒸汽冲击波越来越强,更多的熔化液态物质将被抛出覆盖在孔口边缘,导致喷溅物逐渐增多。

如图 5(g)所示,随着激光功率的增加,入口孔径呈现先增大后变小的趋势。其原因是随着激光功率的增加,作用于材料表面的激光能量密

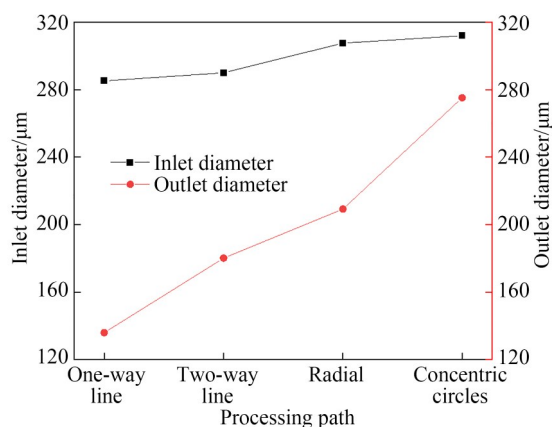


图 4 不同激光加工路径的微孔出入口直径

Fig. 4 Inlet and outlet diameters of micro-hole under different laser processing paths

度会增加,材料汽相/液相比比例会增大,孔中产生的蒸汽冲击波会更强,更多熔化液态物质将被带走,继而使得孔径不断变大;但随着材料汽相/液相比比例的进一步增大,光致等离子体电离程度不断增强,其对激光能量的屏蔽效应也变得越来越明显,使得处于熔化状态的液相物质重新凝结,故而导致入口孔径再次变小。

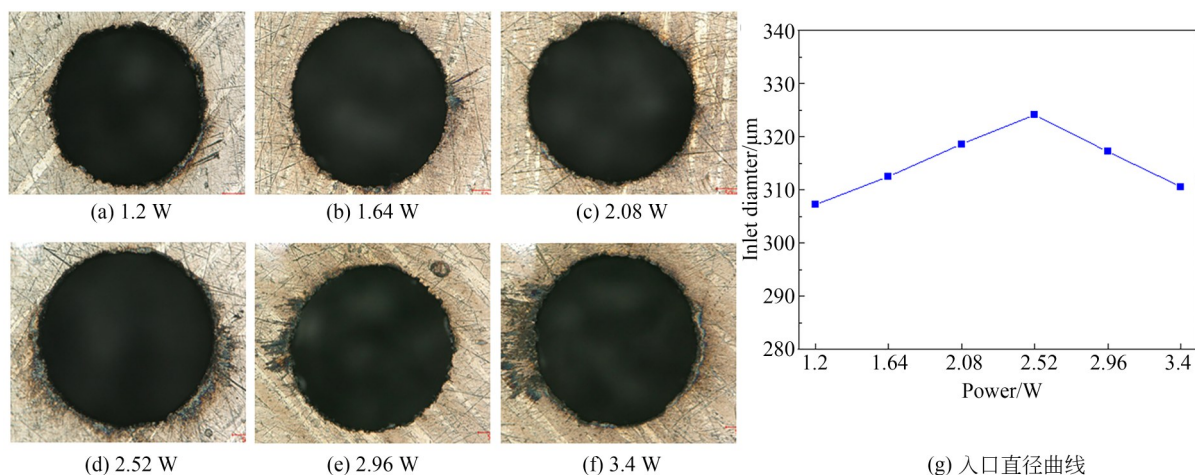


图 5 不同功率下微孔入口形貌图和直径

Fig. 5 Inlet morphology and diameter of the micro-hole under different laser power rates

3.3 激光切割速度对微孔成形的影响

在激光功率 $2.52\ \text{W}$ 、离焦量 $-0.1\ \text{mm}$ 的条件下,探究了激光切割速度对微孔成形的影响。如图 6(a)~6(f)所示,随着切割速度的增大,小孔的边缘圆滑度明显变差,但微孔入口边缘的热影响区逐渐变小。这是由于随着切割速度增加,光斑重叠率降低,即前一脉冲激光能量与后一脉冲

激光能量的叠加效果降低,加工区域的功率密度降低,因此孔口圆滑度降低。此外,由于激光作用时间相应减小,对基体材料的热影响范围也随之减小。

如图 6(g)所示,当切割速度不断增加时,入口孔径会逐渐减小。这是由于当切割速度不断增加,光斑重叠率不断降低,而脉冲重叠

区域的减小导致激光作用在试样单位区域的功率密度降低,进而导致单位时间内激光熔

化、汽化材料的减少,最终造成入口孔径的减小。

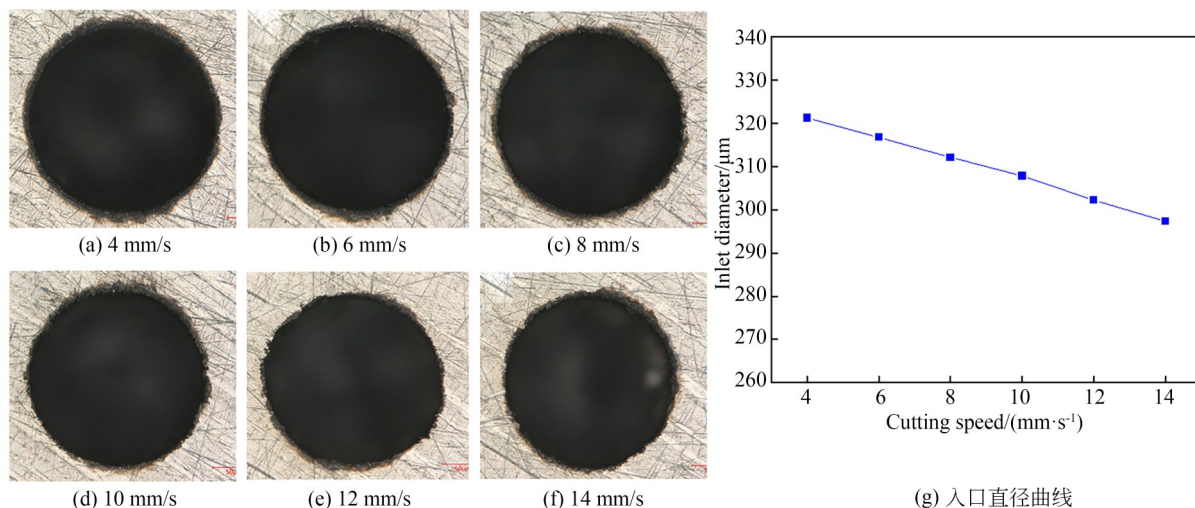


图 6 不同切割速度下微孔入口形貌图和直径

Fig. 6 Inlet morphology and diameter of the micro-hole under different laser cutting speeds

3.4 离焦量对微孔成型的影响

在激光功率 2.52 W,切割速度为 8 mm/s 的条件下,探究了离焦量对微孔成型的影响。如图 7(a)~7(f)所示,当正离焦量较大时,微孔出口呈椭圆状且在其长轴方向有明显烧蚀区,如图 7(d)~7(f)所示;随着离焦量逐渐减小,直至减到负值时,得到的孔的形貌越来越好,当离焦量为 $-100\ \mu\text{m}$ 时,孔的出口形貌最好,如图 7(b)所示;但当负离焦量过大时,微孔出口出现明显的喷溅物,如图 7(a)所示。

微孔直径的变化如图 7(g)所示,当离焦量大于零时,离焦量越正,微孔出口直径越小,当离焦量小于零时,微孔出口直径随着离焦量的减小,先增大后减小。其原因是:在正离焦时,作用在工件上的激光光斑变大,孔内壁吸收到的激光能量减少,但是激光光斑的辐照面积变大,使得孔的入口直径变大,出口直径减小,锥度变大。当继续增加正离焦,超过焦深范围时,光斑的能量密度大幅减少,甚至会打出盲孔。在负离焦时,材料表面在激光的焦深范围内,材料表面和孔内

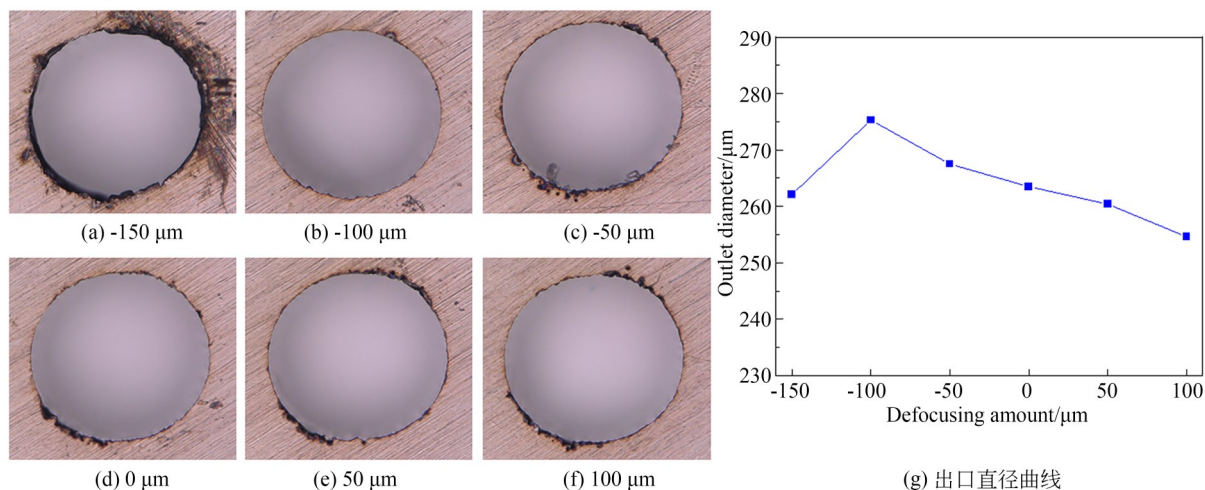


图 7 不同离焦量下微孔出口形貌图和直径

Fig. 7 Outlet morphology and diameter of the micro-hole under different laser defocusing amounts

壁都能得到较多的激光能量,形成出入口直径相近的直孔,而当负离焦过大时,同样由于激光辐照在表面上的激光光斑增大,功率密度降低,使得孔内壁吸收光能减少,出口孔径减小,孔锥度也会增大。

3.5 电解电压对抛光效果的影响

不锈钢表面的电解抛光本质上是氧化膜生成与溶解交替进行的加工过程。当阳极的溶解速度大于电极界面附近金属离子的扩散速度,在金属表面和电解液之间形成一层粘稠的液体膜—扩散层,如图 8 所示。扩散层在微观凸起处的厚度小、微观凹坑处的厚度大,由于浓度梯度作用,微观凸起处的扩散速度比微观凹坑处更快,且微观凸起处的电力线更集中、电流密度更大,导致微观凸起处的溶解速度快、凹坑处的溶解速度慢,因此金属表面被逐渐整平,表面粗糙度降低。

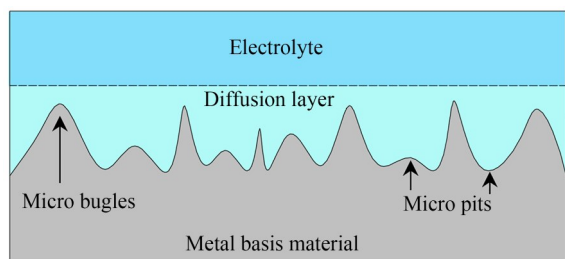


图 8 电解抛光原理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of electrochemical polishing principle

图 9 为不同加工电压对激光加工后工件表面的抛光效果。当加工电压较小时,工件表面形成一层黑色氧化层,如图 9(a)所示;随着加工电压逐渐增大,工件表面由黑色向亮白色转变,表面粗糙度也显著降低,如图 9(c)~9(d)所示;但当加工电压过大时,工件表面出现过腐蚀,光滑表面也再次变得粗糙,如图 9(e)~9(f)所示。这是由于当电压较小时,工件表面发生阳极氧化生成氧化层,此时氧化层成分主要是 Fe_3O_4 ,故呈现出黑色,而且由于电压较小未能使氧化层破碎;随着电压增大,黑色氧化层被溶解去除并在工件表面形成扩散层,开始电解抛光作用,工件表面也由黑色转变为亮白色;但当加工电压过大后,高

电流密度强化了溶液中阴/阳离子传质速度,金属材料去除量显著增大,此时也由电解抛光转为电解刻蚀,而且由于不锈钢是合金材料,各组分材料的电解溶解速度不同,最终导致加工表面凹凸不平,粗糙度增大。

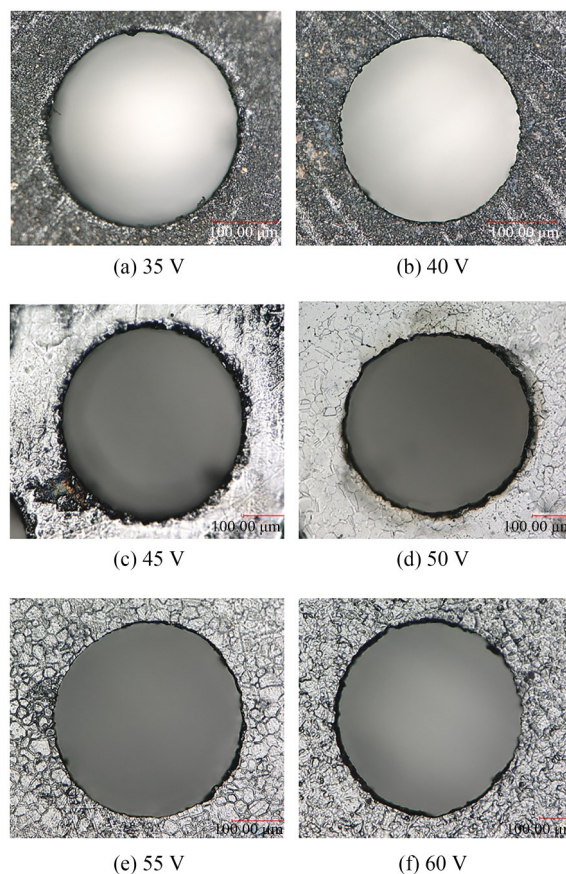


图 9 不同加工电压下工件表面电解抛光效果

Fig. 9 Electrochemical polishing effect of workpiece surface under different processing voltages

3.6 安全滤网阵列网孔的加工

图 10 所示为安全滤网阵列网孔的二维图,安全滤网网板外径为 7.2 mm,壁厚为 0.15 mm,工件表面规则分布 253 个、孔中心距为 0.44 mm 的阵列微孔结构,微孔入口直径和出口直径分别为 (0.31 ± 0.008) mm 和 (0.27 ± 0.008) mm。

基于优化的工艺参数,开展了安全滤网阵列网孔的加工,图 11 所示为激光加工后的工件形貌图和尺寸分布图。如图所示,激光加工以每孔 18 s 的打孔速度在工件表面加工出 253 个规则分布的微孔结构,微孔孔口周围残留毛刺和喷溅的

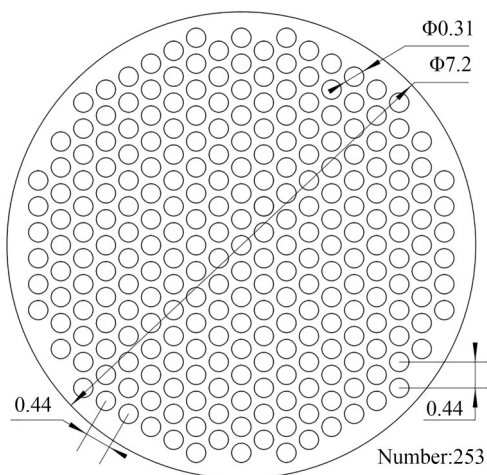


图 10 安全滤网阵列网孔二维图

Fig. 10 Two-dimensional diagram of the array micro-holes of safety filter

熔融物,工件表面上未加工区也因激光高温作用被氧化成黄色。对 253 个微孔进行编号并选取

12 个微孔进行测量和计算,如图 11(d)所示,微孔直径的波动范围较小,入口直径和出口直径的平均值分别为 $312.1 \mu\text{m}$ 和 $275.3 \mu\text{m}$ 、方差分别为 1.72 和 2.11,这表明激光加工的阵列网孔的孔径一致性较高。

图 12 所示为经过电解抛光后的工件形貌图和尺寸分布图。如图所示,用时仅需 2 min 将微孔孔口附近喷溅的熔融物和毛刺溶解蚀除,工件表面上的氧化层也被抛光去除,工件的形貌质量得到明显提升。如图 12(d)所示,电解抛光后的入口直径和出口直径的平均值分别为 $313.3 \mu\text{m}$ 和 $276.1 \mu\text{m}$ 、方差分别为 1.71 和 2.02,电解抛光后的微孔直径较激光加工的微孔有微量增大,这是由于工件材料被电化学抛光蚀除所致,但抛光后的直径波动范围依然较小,这说明电解抛光后的阵列网孔仍然保持较高的尺寸一致性。激光-电解组合加工可以实现安全滤网阵列网孔结构的高效,高质量加工,以及工程化应用。

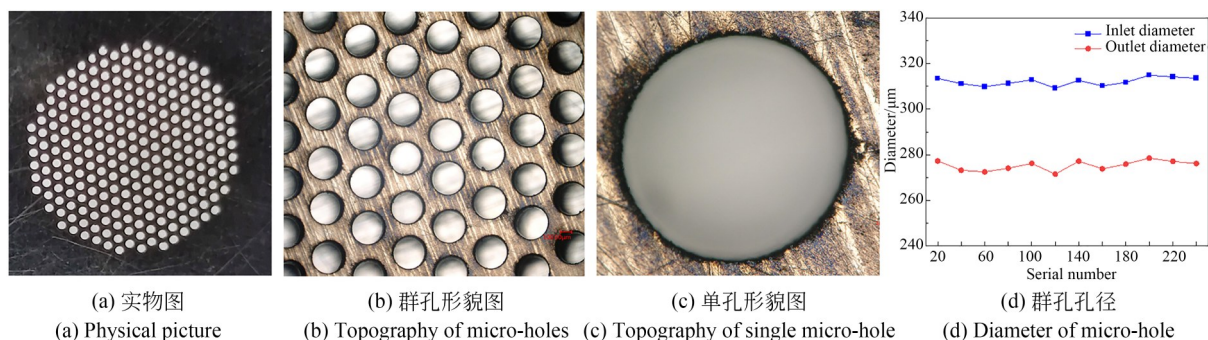


图 11 激光加工的安全滤网阵列群孔结构

Fig. 11 Array micro-holes of safety filter after laser machining

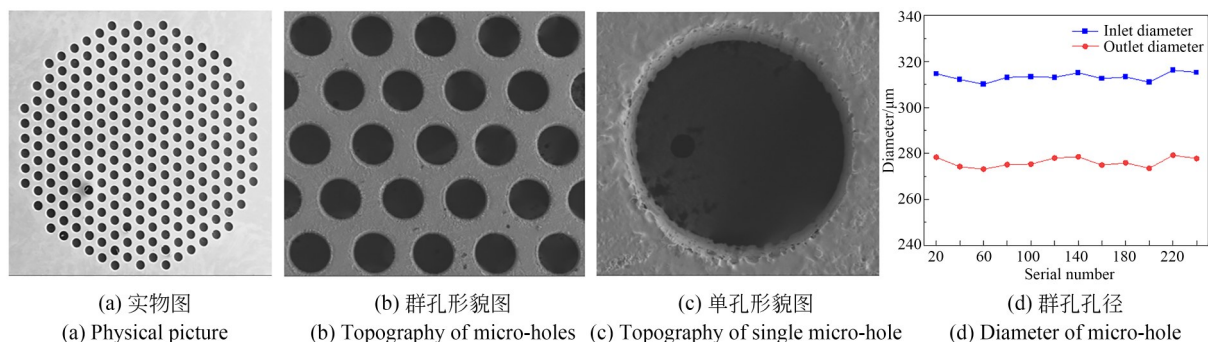


图 12 电解抛光后的安全滤网阵列群孔结构

Fig. 12 Array micro-holes of safety filter after electrochemical polishing machining

5 结 论

本文提出采用激光-电解组合加工技术制备安全滤网阵列网孔结构,研究了工艺参数对微孔的加工形貌和加工尺寸的影响规律,并开展了安全滤网阵列网孔的制备,得到以下结论:

(1) 常规加工路径(单向直线、双向直线和射线)加工出的微孔出口呈现明显的椭圆形,而当加工路径为同心圆时,微孔出口圆度得到显著改善,优化后的路径为外径 270 μm 、内径 230 μm 、线间距 2.5 μm 的同心圆轨迹;

(2) 激光功率和切割速度显著影响激光能量密度,激光功率越大、切割速度越小,作用于工件材料表面的激光能量密度越大,因此材料蚀除量

越多,微孔尺寸越大,但热影响区也越来越大;离焦量对微孔出口形貌和尺寸影响较大,在负离焦时,能够减小微孔出入口直径差,当离焦量为 -0.1 mm 时,出入口直径差最小;

(3) 硝酸钠乙二醇溶液作为抛光液能够在加工表面形成扩散层发生电解抛光,验证了非水基溶液作电解抛光液的可能性,当加工电压为 50 V 时,工件表面的喷溅物和毛刺等缺陷被全部去除;

(4) 基于优选参数,激光-电解组合加工技术制备的阵列群孔入口和出口的直径平均值分别为 313.3 μm 和 276.1 μm 、方差分别为 1.71 和 2.02,具有较高的尺寸一致性。

参考文献:

- [1] 李闯,张明,魏小辉,等. 飞机起落架收放液压系统设计、分析与实验验证[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(2): 225-231.
LI C, ZHANG M, WEI X H, *et al.* Design, analysis and experimental validation for hydraulic extension/retraction system of aircraft landing gears[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2014, 46(2): 225-231. (in Chinese)
- [2] 刘涌泉,李巍,牛伟,等. 航空液压系统流量智能预测方法研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(28): 12476-12483.
LIU Y Q, LI W, NIU W, *et al.* Intelligent flow forecasting method of aviation hydraulic system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(28): 12476-12483. (in Chinese)
- [3] 胡振磊. 安全滤网及其抗堵塞能力浅析[J]. 中国机械, 2019(18): 154-155.
HU Z L. Analysis of safety filter screen and its anti-blocking ability[J]. *Machine China*, 2019(18): 154-155. (in Chinese)
- [4] FOTOVATI S, HOSSEINI SA, TAFRESHI HV, *et al.* Modeling instantaneous pressure drop of pleated thin filter media during dust loading[J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(18): 4036-4046.
- [5] 钱锋. 精密微小孔的加工技术研究[J]. 现代制造技术与装备, 2015(5): 52-54.
QIAN F. Research on machining technology of precision micro hole[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2015(5): 52-54. (in Chinese)
- [6] Chen N, Li HN, Wu J, *et al.* Advances in micro milling: from tool fabrication to process outcomes[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 160: 103670.
- [7] 弯艳玲,杨健. 高速微钻削构建孔阵列疏水表面[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(4): 60-63.
WAN Y L, YANG J. Micro-hole array hydrophobic surface by high speed micro-drilling technology[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2018, 41(4): 60-63. (in Chinese)
- [8] JITHIN S, JOSHI S S. Surface topography generation and simulation in electrical discharge texturing: a review[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 298: 117297.
- [9] RAVI N, CHUAN SHAN XUE. The effects of electro-discharge machining block electrode method for microelectrode machining[J]. *Journal of Micro-mechanics and Microengineering*, 2002, 12(5): 532-540.
- [10] WANG D, WU J, ZHAO W, *et al.* Micro tool electrode fabrication using edge electrode discharge grinding[C]. *Proceedings of the International Symposium on Electromachining*, 2010.
- [11] 翁明浩. 微细阵列轴孔的电火花和电化学加工工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
WENG M H. Study on EDM and Electrochemi-

- cal Machining Technology of Micro-Array Shaft Hole* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [12] 王峰, 赵昌辉, 张恩元. 高速电火花小孔加工工艺及应用[J]. 中国新技术新产品, 2016(20): 68. WANG F, ZHAO C H, ZHANG E Y. Small hole machining technology and application of high speed EDM[J]. *New Technology & New Products of China*, 2016(20): 68. (in Chinese)
- [13] QU NS, ZHANG XF, CHEN XL, *et al.* Modified microscale pattern transfer without photolithography of substrates[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 218: 71-79.
- [14] ZHANG X, QU N, FANG X.. Sandwich-like electrochemical micromachining of micro-dimples using a porous metal cathode [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 311: 357-364.
- [15] FANG X, QU N, ZHANG Y, *et al.* Improvement of hole exit accuracy in electrochemical drilling by applying a potential difference between an auxiliary electrode and the anode[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(3): 556-564.
- [16] ZHANG Y, QU N, FANG X, *et al.* Eliminating spikes by optimizing machining parameters in electrochemical drilling[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 37: 488-495.
- [17] WANG X, QU N, FANG X, *et al.* Electrochemical drilling with constant electrolyte flow[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 238: 1-7.
- [18] ZHU D, WANG W, FANG X L, *et al.* Electrochemical drilling of multiple holes with electrolyte-extraction [J]. *CIRP Annals*, 2010, 59 (1) : 239-242.
- [19] 王维. 群小孔电解加工的关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010. WANG W. *Research on Key Technology of Electrolytic Machining of Group Small Holes* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [20] 解孟涛, 刘俊标, 王鹏飞, 等. 电子束曲面直写的 Monte Carlo 仿真与实验[J]. 光学精密工程, 2022, 30(18): 2232-2240. XIE M T, LIU J B, WANG P F, *et al.* Monte Carlo simulation and experiments of electron beam direct writing on curved[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(18): 2232-2240. (in Chinese)
- [21] ZHANG Y, SHEN Z, NI X. Modeling and simulation on long pulse laser drilling processing[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 73: 429-437.
- [22] 李鹏举, 潘登, 刘顺利. 长焦深连续立方相位板的飞秒激光加工与性能测试[J]. 光学精密工程, 2022, 30(17): 2088-2093. LI P J, PAN D, LIU S L. Continuous cubic phase plate with long depth of focus fabricated by femtosecond laser and its optical performance[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30 (17) : 2088-2093. (in Chinese)
- [23] 杨立军, 孔宪俊, 王扬, 等. 激光微孔加工技术及应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(19): 30-38. YANG L J, KONG X J, WANG Y, *et al.* Laser micro-holes machining technology and its application[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(19): 30-38. (in Chinese)
- [24] KAMLAGE G, BAUER T, OSTENDORF A, *et al.* Deep drilling of metals by femtosecond laser pulses [J]. *Applied Physics A*, 2003, 77 (2) : 307-310.
- [25] WANG Y F, YANG F, ZHANG G Y, *et al.* Fabrication of deep and small holes by synchronized laser and shaped tube electrochemical machining (Laser-STEM) hybrid process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(5/6): 2721-2731.
- [26] NGUYEN MD, RAHMAN M, WONG YSAN. Simultaneous micro-EDM and micro-ECM in low-resistivity deionized water[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 54/55: 55-65.
- [27] 余毅权. 激光脉冲电解射流复合加工技术试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011. YU Y Q. *Experimental Study on Composite Machining Technology of Laser Pulse Electrolytic Jet* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [28] ZHANG Y, XU Z, ZHU D, *et al.* Tube electrode high-speed electrochemical discharge drilling using low-conductivity salt solution [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 92: 10-18.
- [29] 刘坤坤, 孙伶俐, 何声馨, 等. 316 不锈钢电解抛

光最佳参数试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 288-294.

LIU K K, SUN L L, HE S X, *et al.* Experimen-

tal study on optimal parameters of electrolytic polishing of 316 stainless steel[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(8): 288-294. (in Chinese)

作者简介:



葛声宏(1980—),男,研究员,博士研究生,主要研究方向:电液伺服阀设计、精密加工、伺服装置研发及核心关键技术研究。E-mail: smilegeshenghong@163.com



申继文(1995—),男,河南信阳,博士研究生,主要研究方向:电化学加工、激光电解组合加工技术等。E-mail: shenjiw@nuaa.edu.cn

通讯作者:



曾永彬(1978—),男,重庆人,教授,博士生导师,主要研究方向:特种加工、微细加工及复合加工技术等。E-mail: binyz@nuaa.edu.cn