

引文格式: 张亚楠, 牛岫, 明平美, 等. GH4169镍基高温合金射流电解加工微坑阵列试验研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(18): 54-59.
ZHANG Yanan, NIU Shen, MING Pingmei, et al. Experimental research on micro-pit array by jet electrochemical machining on GH4169 nickel-based superalloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(18): 54-59.

GH4169镍基高温合金射流电解加工微坑阵列试验研究*

张亚楠¹, 牛岫¹, 明平美¹, 王思儒¹, 丁达付², 秦歌¹

(1. 河南理工大学, 焦作 454000;

2. 洛阳乐方重工机械有限公司, 洛阳 471300)

[摘要] 表面微坑阵列在机械密封、摩擦磨损、表面润滑、传热散热等方面有巨大作用。为了能在 GH4169 镍基高温合金上射流电解加工微坑阵列, 通过测试合金在不同溶液中的极化曲线, 优选了射流电解加工合金的电解液, 并在此基础上设计试验, 探究了加工电压、射流速度对射流电解加工微坑的影响规律, 并通过优选工艺参数加工出微坑阵列。最后, 以质量分数 10% 的 NaNO_3 溶液为电解液, 以加工电压 25 V、射流速度 10 m/s 加工出平均深径比为 0.376、深径比标准偏差为 0.004372 的加工精度高、一致性好的微坑阵列结构。

关键词: 射流电解加工; 微坑阵列; GH4169 镍基高温合金; 深径比; 电解液

Experimental Research on Micro-Pit Array by Jet Electrochemical Machining on GH4169 Nickel-Based Superalloy

ZHANG Yanan¹, NIU Shen¹, MING Pingmei¹, WANG Siru¹, DING Dafu², QIN Ge¹

(1. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Luoyang Lefang Heavy Industry Machinery Co., Ltd., Luoyang 471300, China)

[ABSTRACT] The surface micro-pit array plays a huge role in mechanical sealing, friction and wear, surface lubrication, heat transfer and heat dissipation. To be able to jet electrochemical machining micro-pit array on GH4169 nickel-based superalloy, the polarization curves of the alloy in different electrolytes were tested and the electrolyte was optimized. Then, the influence of processing voltage and jet velocity on the micro-pits by jet electrochemical machining was explored, and the micro-pit array was processed by optimizing the process parameters. Finally, using mass fraction 10% NaNO_3 as the electrolyte, processing voltage of 25 V, and jet velocity of 10 m/s, the micro-pit array with high precision and good consistency is fabricated. The aspect ratio is 0.376 and the standard deviation of the aspect ratio is 0.004372 for the micro-pit array.

Keywords: Jet electrochemical machining; Micro-pit array; GH4169 nickel-based superalloy; Aspect ratio; Electrolyte

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.18.054

表面微坑阵列广泛应用于摩擦副、传热散热部件和密封结构表面, 具有减小摩擦磨损、减小阻力、提高承载力、增强散热等功能, 可大幅提高产品性能^[1-2]。因此, 金属材料表面加工微坑阵列一直是业界的热点。

GH4169 镍基高温合金因具有高硬度、优异的高温抗拉强度、良好的耐磨性和耐腐蚀性等优点, 广泛应用于航空航天、汽车船舶、能源化工等领域^[3-4]。然而, GH4169 优异的高硬度、高温强度也使其成为难加工材

* 基金项目: 中原科技创新领军人才计划(214200510018); 中国博士后科学基金(2020M682289); 河南省重点研发与推广专项(222102220001); 河南省高等学校重点科研项目计划(21A460016); 河南理工大学博士基金(B2020-30)。

料之一,采用传统方法加工时,存在刀具磨损快、表面毛刺多等问题,给制造业带来了诸多挑战^[5]。

射流电解加工是采用金属喷嘴作为工具阴极,使电解液从金属喷嘴内部直接喷射在工件表面,利用电化学阳极溶解原理实现工件特定位置材料去除的技术^[6-8]。由于射流电解加工不存在刀具磨损和表面毛刺等问题,无须考虑材料的硬度和韧性,对于 GH4169 等难加工材料加工具有很好的应用前景^[9]。

经过多年发展,射流电解加工研究已取得了明显进展。Ming 等^[10-13]提出了煤油浸没式射流电解加工技术,并进一步研究了电解液射流方位对加工质量的影响,发现采用水平射流方位可获得边缘杂散腐蚀较少且表面质量较高的不锈钢微坑结构。Ao 等^[14-15]以 TB6 钛合金、SiC 颗粒增强铝基复合材料为对象开展了射流电解加工试验研究,通过优选电解液、加工电压等参数,制备出精度较高的微坑结构。颜红娟等^[16]通过优化射流电解加工 GH4169 倾斜孔过程中加工电压、喷嘴进给速度等工艺参数,有效提高了加工精度和材料去除率。Wang 等^[17]提出了通过调控电解液反射状态来抑制射流电解加工边缘杂散腐蚀的方法,发现当反射边界与喷嘴走刀方向夹角为 0° 时,所获 GH4169 槽边缘近无杂散腐蚀。Mitchell-Smith 等^[18-19]提出了喷嘴角度可调节的射流电解加工工艺,发现当电解液射流方向与进给方向呈锐角时, GH4169 微槽的表面粗糙度值可明显降低。然而,在 GH4169 材料上以射流电解加工技术制备微坑阵列至今仍鲜有报道。

本文利用射流电解加工技术在 GH4169 镍基高温合金上加工微坑阵列结构。通过测试合金在不同溶液中的极化曲线,优选射流电解加工合金的电解液,然后基于此探究射流电解加工微坑的工艺参数的影响规律,并在优选工艺参数下加工出微坑阵列结构。

1 试验与方法

1.1 试验材料

试验试样为 GH4169 镍基高温合金工件,其主要化学成分如表 1 所示。工件尺寸为 20 mm × 20 mm × 2 mm。试验前对工件待加工表面进行打磨抛光、超声水洗。

1.2 试验步骤

1.2.1 电化学测试

由于 GH4169 是由多种元素组成的复杂合金,在不同溶液中的电化学溶解特性也不尽相同,有必要通过极化曲线测试探究合金在不同溶液中的溶解特性,并优选电解液,具体试验参数如表 2 所示。使用电化学工作站 CHI604E (CH Instruments) 进行极化曲线测试,采用三电极体系,铂片为对电极 (CE),饱和甘汞电极为参比电

极 (RE), GH4169 工件为工作电极 (WE)。

1.2.2 射流电解加工微坑结构

射流电解加工试验装置如图 1 所示。该装置由三轴运动控制系统、电解液供应装置和电源供给装置组成。加工电源为可编程直流电源 IT6122 (ITECH),可输出加工电压为 0~30 V。GH4169 工件连接加工电源正极以形成工件阳极。射流引液装置如图 2 所示,金属喷嘴通过夹具固定于中空电解液管下方,并与加工电源负极相连作为工具阴极。金属喷嘴(工具阴极)材质为 304 不锈钢,其内径为 230 μm,外径为 450 μm。

GH4169 是高硬度的难加工材料,进行射流电解加工时,若电压选择不当,将导致无法持续破坏工件表面的钝化膜进而无法去除材料,因此优选加工电压十分重要。射流电解加工中射流速度影响着电解回路的稳定和电解产物的及时排出,因此射流速度是十分重要的影响因素。本文探究了不同加工电压和射流速度对微坑

表 1 GH4169 镍基高温合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of GH4169 nickel-based superalloy (mass fraction) %

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Al
0.038	0.16	0.12	0.0010	0.010	52.75	17.96	0.55
Cu	Co	Ti	Mo	Nb	B	Ta	Fe
0.022	0.018	1.09	3.05	5.13	0.0020	0.010	余量

表 2 极化曲线测试电解液选择

Table 2 Electrolyte selection for polarization curve test

电解液	质量分数/%	温度/℃
H ₂ SO ₄ 溶液	10	20
NaCl 溶液	10	20
NaNO ₃ 溶液	10	20
NaOH 溶液	10	20

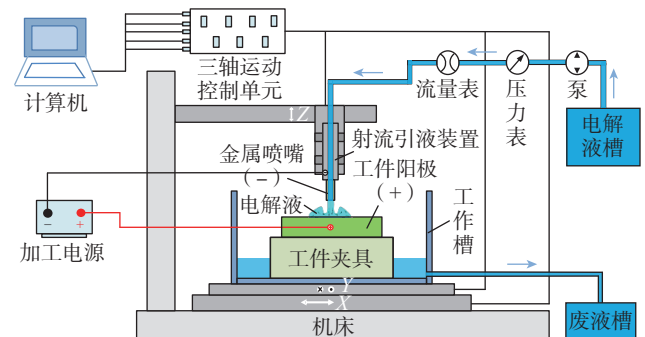


图 1 射流电解加工试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup of jet electrochemical machining

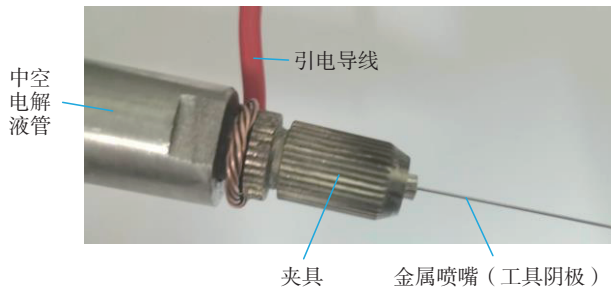


图2 射流引液装置实物图

Fig.2 Physical drawing of the jet drainage device

加工的影响,试验参数如表3所示,并以优选工艺参数加工微坑阵列。

1.3 试验结果表征

用扫描电镜 Merlin Compact (Carl Zeiss NTS GmbH) 观察加工后微坑的表面形貌。用超景深三维显微镜 VHX-2000 (Keyence) 测量加工后微坑的深度和直径,观察其三维形貌。

2 结果与讨论

2.1 电化学测试

测试了 GH4169 镍基高温合金在 4 种溶液的静水状态下 $-1\sim 3\text{ V}$ 的极化曲线,结果如图3所示,4种溶液中的极化曲线都可观察到从活性溶解区到钝化区、过渡区,再至过钝化区的4个区域。

从图3中可得到合金在4种溶液中的钝化电流密度 i_1 、钝化电位 E_1 、过渡钝化电位 E_2 和钝化区电位范围 ΔE_{12} 等电化学参数都有明显差别,具体数值如表4所示。钝化区电位范围 ΔE_{12} 描述了合金在相应溶液中表面形成钝化膜的稳定性,其值越大,表明形成的钝化膜越稳定^[20]。钝化电流密度 i_1 表明了合金在相应溶液中的耐腐蚀性强弱,其值越大,表明形成的钝化膜越不稳定,合金耐腐蚀越低^[21]。

在钝化区,合金在 NaOH 溶液中的钝化电流密度最大,钝化区电位范围最小,表明在 NaOH 溶液中形成的钝化膜最不稳定,不足以对合金起保护作用。合金在 H_2SO_4 溶液中的钝化电流密度和钝化区电位范围都仅次于 NaOH 溶液,表明在 H_2SO_4 溶液中的钝化膜也极不稳定。合金在 NaNO_3 溶液中的钝化区电位范围明显大于在 NaCl 溶液中的钝化区电位范围,表明合金在 NaNO_3 溶液中形成的钝化膜最稳定。

在过渡区,合金表面的钝化膜开始破裂,材料开始发生溶解。在 NaNO_3 溶液中的过渡钝化电位 E_2 要明显大于在 NaCl 溶液中的过渡钝化电位 E_2 ,这表明合金在 NaNO_3 溶液中比在 NaCl 溶液中更耐腐蚀。其主要原因为 Cl^- 是一种比较活跃的离子,能以强大的活化能

表3 射流电解加工微坑试验参数

Table 3 Experimental parameters of micro-pits in jet electrochemical machining

试验参数	值或变量
加工电压/V	10, 15, 20, 25, 30
射流速度/(m/s)	4, 6, 8, 10
加工间隙/ μm	200
加工时间/s	15

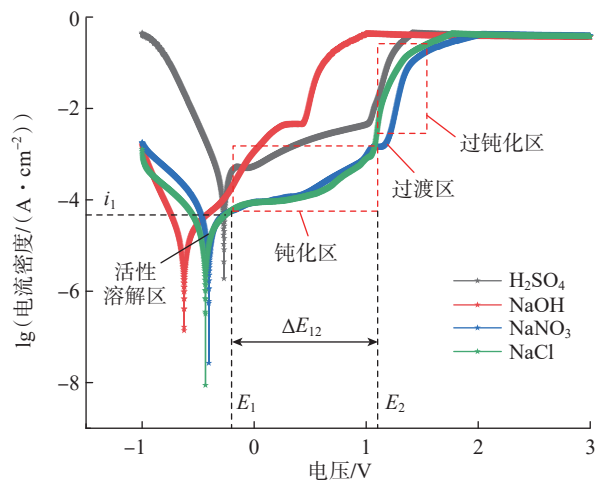


图3 GH4169 镍基高温合金在不同溶液中的极化曲线

Fig.3 Polarization curves of GH4169 nickel-based superalloy in different electrolytes

表4 GH4169 镍基高温合金在不同溶液中的电化学参数

Table 4 Electrochemical parameters of GH4169 nickel-based superalloy in different electrolytes

电解液	钝化电流密度 $i_1 / (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	钝化电位 E_1/mV	过渡钝化电位 E_2/mV	钝化区电位范围 $\Delta E_{12}/\text{mV}$
H_2SO_4 溶液	519.8	-137	1018	1155
NaOH 溶液	4101	238	441	203
NaNO_3 溶液	41.3	-298	1161	1459
NaCl 溶液	41.93	-281	1051	1332

破坏合金表面的钝化膜,而 NO_3^- 是一种钝化性离子,对钝化膜的破坏性不强,从而钝化膜对合金起到有效的保护作用^[22]。

当电位大于过渡钝化电位 E_2 时进入过钝化区。在过钝化区,钝化膜完全破裂,材料迅速溶解。在 NaNO_3 溶液中,电流密度急剧增加,加工区域材料完全溶解,而未加工区域由于钝化膜稳定,保护作用强,杂散腐蚀少。因此,相比而言,优选 NaNO_3 溶液作为射流电解加工的电解液。

2.2 工艺参数对射流电解加工微坑的影响

2.2.1 加工电压的影响

以质量分数 10% 的 NaNO_3 溶液为电解液,在射流速度 6 m/s 下探究加工电压对射流电解加工微坑的影响。不同加工电压下微坑深度和直径的变化,如图 4 (a)所示,随着加工电压的增大,微坑深度和直径均增大,但 25~30 V 微坑深度和直径的增量均有所减小。不同加工电压下微坑深径比的变化,如图 4 (b)所示,随着加工电压的增大,微坑深径比也增大,但 25~30 V 微坑深径比有所减小。

主要原因为,随着加工电压的增大,电流密度增大,材料去除率增加,微坑深度、直径和深径比也逐渐增大。但随着加工电压继续增大,微坑深度继续增加,加工间隙也继续增大,如当加工电压增大至 30 V 时,随着微坑深度越来越大,微坑边缘的电流密度大于微坑底部,从而使微坑直径方向的溶解速率大于深度方向溶解速率,导致深径比有所减小,加工精度降低。当加工电压为 25 V 时,微坑深径比大,加工精度高。因此,优选 25 V 的加工电压进行射流电解加工微坑。

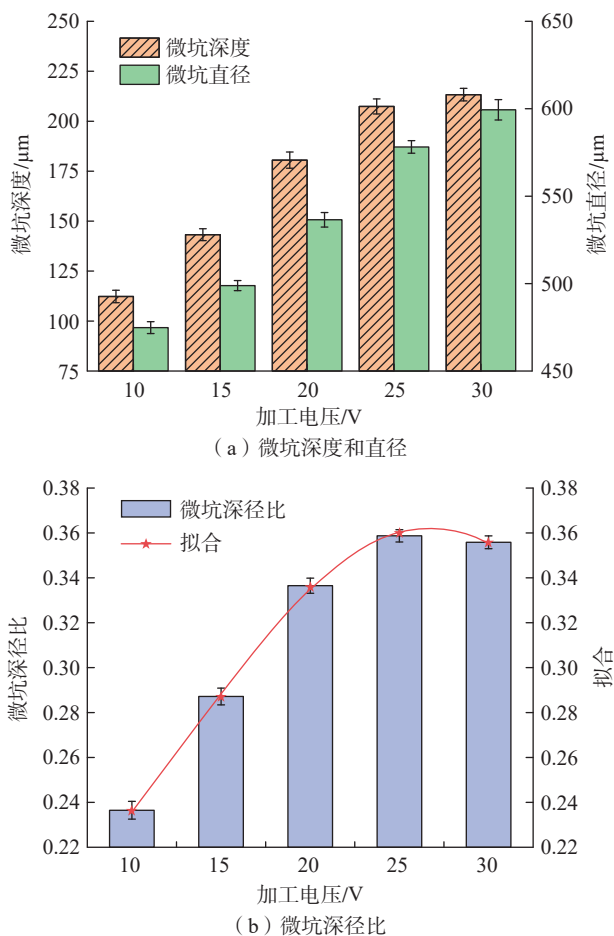


图 4 不同加工电压下微坑深度、直径和深径比

Fig.4 Depth, diameter, and aspect ratio of micro-pits under different processing voltages

2.2.2 射流速度的影响

在 25 V 的加工电压下,探究了射流速度对电解加工微坑的影响。不同射流速度下微坑深度和直径的变化,如图 5 (a)所示。不同射流速度下微坑深径比的变化,如图 5 (b)所示。随着射流速度的增加,微坑深度、直径和深径比均增大。其主要原因为,射流速度从 4 m/s 增至 10 m/s,电解回路逐渐趋于稳定,不存在短路的情况,加工过程更加稳定,传质增强;且定性越来越好,电解液束将电场限定在更加集中的范围内,电场与流场耦合作用增强,电导率增大,从而材料去除率增加,微坑深度、直径和深径比均增大。且在 10 m/s 的高流速下,加工产物冲刷排出及时,产物黏附问题得到显著改善,加工过程稳定,加工区域阻力小,从而材料去除率大,加工精度高。故以 10 m/s 的射流速度进行射流电解加工时,可以更高加工精度成形微坑结构。图 6 所示为加工电压 25 V、射流速度 10 m/s 下微坑三维形貌,用激光共聚焦显微镜 OLS5100 (Olympus) 测量微坑内部面粗糙度 S_a 为 $0.874 \mu\text{m}$ 。

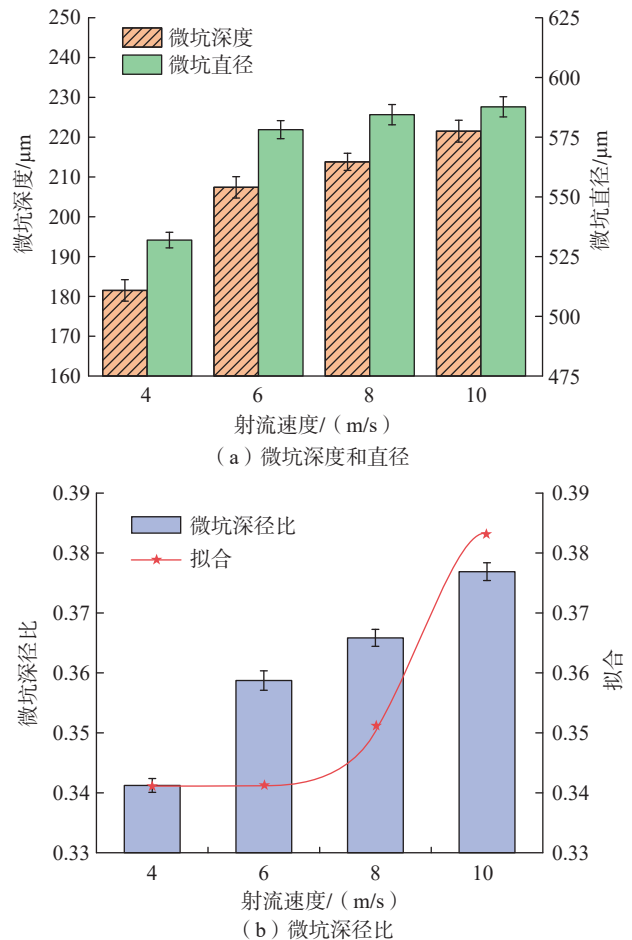


图 5 不同射流速度下微坑深度、直径和深径比

Fig.5 Depth, diameter, and aspect ratio of micro-pits under different jet velocities

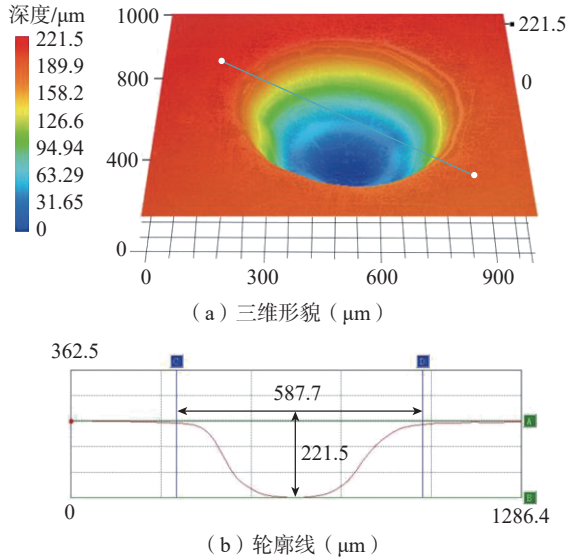


图6 微坑三维形貌和轮廓线
Fig.6 3D morphology and contour of micro-pits

2.3 微坑阵列结构的加工

以加工电压 25 V、射流速度 10 m/s 加工出 5 × 5 的微坑阵列结构,相邻两微坑间距为 1500 μm,共计 25 个微坑,如图 7 所示。微坑阵列结构深径比柱状分布,如图 8 所示。微坑阵列结构深度、直径和深径比一致性较好,平均深度为 220.276 μm,深度标准偏差为 3.741 μm;平均直径为 585.692 μm,直径标准偏差为 3.609 μm;平均深径比为 0.376,深径比标准偏差为 0.004372。

3 结论

本研究测试了 GH4169 镍基高温合金在 NaNO₃、NaCl、H₂SO₄、NaOH 溶液中的极化曲线,探究了加工电压、射流速度对射流电解加工微坑的影响,优选出电解液和工艺参数,加工出精度高、一致性好的微坑阵列结构。得出如下结论。

(1) 在极化曲线测试中, GH4169 在 NaOH 溶液中形成的钝化膜最不稳定,在 H₂SO₄ 溶液中仅次于 NaOH 溶液,同样钝化膜极不稳定。在 NaNO₃ 溶液中形成的钝化膜最稳定,故优选 NaNO₃ 溶液作为射流电解加工的电解液。

(2) 加工电压对射流电解加工微坑的影响表现为,随着加工电压的增大,微坑深度和直径均增大,但增至 30 V 深径比有所减小。加工电压为 25 V 时,微坑深径比大,加工精度高。

(3) 射流速度对射流电解加工微坑的影响表现为,随着射流速度的增大,微坑深度、直径和深径比均明显增大。以 10 m/s 的射流速度进行射流电解加工时,电解回路稳定且传质较好,加工产物排出及时,可高精度成形微坑结构。

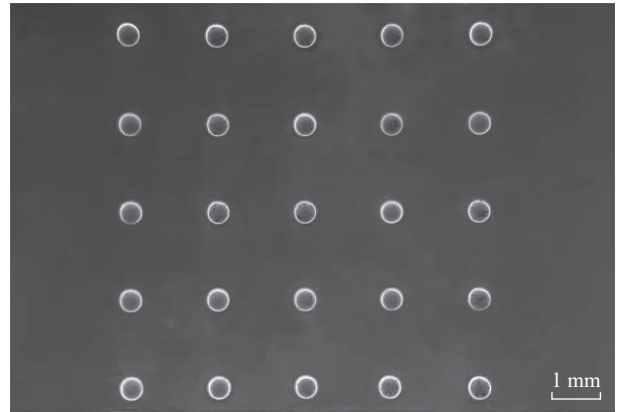


图7 微坑阵列结构
Fig.7 Micro-pit array structure

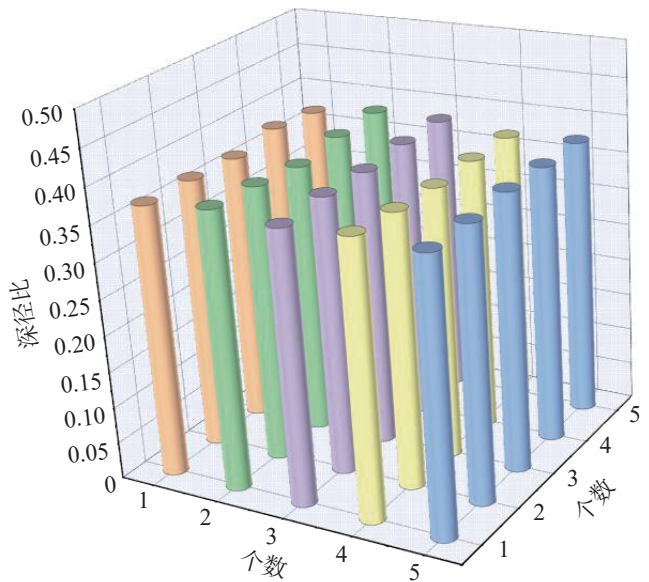


图8 微坑阵列结构深径比柱状分布
Fig.8 Columnar distribution of aspect ratio of micro-pit array structure

(4) 优选工艺参数,以加工电压 25 V、射流速度 10 m/s 加工出精度高、深径比一致性好的微坑阵列结构,其平均深径比为 0.376,深径比标准偏差为 0.004372。

参考文献

[1] CHEN X L, DONG B Y, ZHANG C Y, et al. Jet electrochemical machining of micro dimples with conductive mask[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 257: 101–111.

[2] ZHAI K, DU L, WEN Y, et al. Fabrication of micro pits based on megasonic assisted through-mask electrochemical micromachining[J]. Ultrasonics, 2020, 100: 105990.

[3] 陈仕奇, 刘联平. 原始粉末粒度对GH4169合金选区激光熔化成形件组织和性能的影响[J]. 航空制造技术, 2021, 64(9): 14–20.

CHEN Shiqi, LIU Lianping. Effects of particle size on microstructures and properties of GH4169 alloy by SLM additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(9): 14–20.

[4] 李本凯, 丁文锋, 马艳艳, 等. 新型刚玉砂轮磨削GH4169镍基高温合金的性能评价研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(4): 14–19.

LI Benkai, DING Wenfeng, MA Yanyan, et al. Performance evaluation on grinding of nickel-based superalloy GH4169 using new corundum abrasive wheel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(4): 14–19.

[5] 王维鑫, 吴明阳, 李宝伟, 等. 高压冷却下切削GH4169切屑形态影响因素研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(5): 93–102.

WANG Weixin, WU Mingyang, LI Baowei, et al. Study on factors affecting chip formation during cutting GH4169 under high pressure cooling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(5): 93–102.

[6] KENDALL T, BARTOLO P, GILLEN D, et al. A review of physical experimental research in jet electrochemical machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(1): 651–667.

[7] LIU W D, LUO Z, LI Y, et al. Investigation on parametric effects on groove profile generated on Ti1023 titanium alloy by jet electrochemical machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(9): 2357–2370.

[8] WANG M L, QU N S. Improving material removal rate in macro electrolyte jet machining of TC4 titanium alloy through back-migrating jet channel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 71: 489–500.

[9] LUO J X, FANG X L, ZHU D. Jet electrochemical machining of multi-grooves by using tube electrodes in a row[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 283: 116705.

[10] MING P M, LI X C, ZHANG X M, et al. Study on kerosene submerged jet electrolytic micromachining[J]. Procedia CIRP, 2018, 68: 432–437.

[11] ZHANG X, SONG X, MING P, et al. The effect of electrolytic jet orientation on machining characteristics in jet electrochemical machining[J]. Micromachines (Basel), 2019, 10(6): E404.

[12] LI X C, MING P M, ZHANG X M, et al. Kerosene-submerged horizontal jet electrochemical machining with high localization[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(13): E453–E464.

[13] LI X C, MING P M, ZHANG X M, et al. Study on kerosene-submerged jet electrochemical machining and optimization of the electrochemical machining parameters[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2021, 16(1): 151030.

[14] LIU W D, AO S S, LI Y, et al. Jet electrochemical machining of TB6 titanium alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(5): 2397–2409.

[15] AO S S, QIN X Y, LI K B, et al. Effects of process parameters on jet electrochemical machining of SiC particle-reinforced aluminum matrix composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(11): 3351–3361.

[16] 颜红娟, 李志永, 崔庆伟, 等. 高温镍基合金涡轮叶片气膜冷却孔电解加工基础试验研究[J]. 制造技术与机床, 2018(3): 134–137, 142.

YAN Hongjuan, LI Zhiyong, CUI Qingwei, et al. Fundamental experimental research on electrochemical machining cooling hole of nickel-based superalloy[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(3): 134–137, 142.

[17] WANG X D, QU N S, FANG X L. Reducing stray corrosion in jet electrochemical milling by adjusting the jet shape[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 264: 240–248.

[18] MITCHELL-SMITH J, SPEIDEL A, CLARE A T. Advancing

electrochemical jet methods through manipulation of the angle of address[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 364–372.

[19] CLARE A T, SPEIDEL A, BISTEROV I, et al. Precision enhanced electrochemical jet processing[J]. CIRP Annals, 2018, 67(1): 205–208.

[20] WANG J T, XU Z Y, WANG J, et al. Anodic dissolution characteristics of Inconel 718 in $C_6H_5K_3O_7$ and $NaNO_3$ solutions by pulse electrochemical machining[J]. Corrosion Science, 2021, 183: 109335.

[21] GE Y C, ZHU Z W, WANG D Y. Electrochemical dissolution behavior of the nickel-based cast superalloy K423A in $NaNO_3$ solution[J]. Electrochimica Acta, 2017, 253: 379–389.

[22] WANG Y D, XU Z Y, ZHANG A. Electrochemical dissolution behavior of Ti–45Al–2Mn–2Nb+0.8 vol% TiB_2 XD alloy in $NaCl$ and $NaNO_3$ solutions[J]. Corrosion Science, 2019, 157: 357–369.

通讯作者: 牛岫, 讲师, 博士, 研究方向为电解加工技术和电解机械复合加工技术。

(责编 阳光)

(上接第 36 页)

[14] SONG T, XI F, GUO S, et al. A comparison study of algorithms for surface normal determination based on point cloud data[J]. Precision Engineering, 2015, 39: 47–55.

[15] ZENG C, HU Y H, SHI J, et al. On-machine measurement and compensation of assembling gap for 5-axis friction stir welding based on 2D laser profilometer[C]//2019 IEEE 5th International Conference on Mechatronics System and Robots (ICMSR). Piscataway: IEEE, 2019: 70–75.

[16] 石循磊, 杜坤鹏, 张继文, 等. 基于线激光扫描的飞机表面轮廓参数提取方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 148–154.

SHI Xunlei, DU Kunpeng, ZHANG Jiwen, et al. Method for extracting hole parameters of aircraft surface based on linear laser scanning[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 148–154.

[17] 章绍坤. 航空航天薄壁件五轴加工的轮廓与壁厚误差补偿方法[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.

ZHANG Shaokun. Compensation method for profile and wall thickness errors in five-axis machining of aerospace thin-walled parts[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.

[18] 毕庆贞, 丁汉, 王宇晗. 复杂曲面零件五轴数控加工理论与技术[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2016: 15–34.

BI Qingzhen, DING Han, WANG Yuhan. Theory and technique for five-axis NC machining of complex surface part[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2016: 15–34.

[19] LAMPTON M. Damping-undamping strategies for the Levenberg-Marquardt nonlinear least-squares method[J]. Computers in Physics, 1997, 11(1): 110–115.

[20] 孙红岩, 孙晓鹏, 李华. 基于K-means聚类方法的三维点云模型分割[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(10): 42–45.

SUN Hongyan, SUN Xiaopeng, LI Hua. 3D point cloud model segmentation based on K-means cluster analysis[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(10): 42–45.

通讯作者: 毕庆贞, 研究员, 博士, 研究方向为五轴数控装备、大型薄壁件加工、复杂曲面加工。

(责编 阳光)