

镍基单晶高温合金的微孔加工对比实验研究

巩亚东, 孟凡涛, 孙 瑶, 于兴晨
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 开展镍基单晶高温合金微孔加工实验研究,探讨不同直径、不同截面形状的电极对微孔的尺寸精度、表面质量、加工效率和亚表面损伤等方面的影响. 研究表明,微细螺旋电极的加工效率远大于圆柱电极,其中直径 200 μm 的微细螺旋电极的微孔加工效率比相同直径下的圆柱电极提高 17%,而直径 300 μm 的微细螺旋电极的加工效率可提高 30.56%;微细螺旋电极加工的微孔扩孔量小于圆柱电极的扩孔量,且微细螺旋电极加工得到的孔壁质量优于圆柱电极的;微细螺旋电极所加工的微孔的亚表面损伤层连续且厚度小于圆柱电极所加工的微孔.

关 键 词: 微细螺旋电极;微细圆柱电极;微孔;铜钨合金;镍基单晶高温合金

中图分类号: TG 661 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2020)01-0084-06

Experimental Study on Micro-hole Processing of Nickel-Based Single Crystal Superalloy

GONG Ya-dong, MENG Fan-tao, SUN Yao, YU Xing-chen
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: GONG Ya-dong, E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The micro-hole processing test of nickel-based single crystal superalloy was carried out to investigate the effects of electrodes with different diameters and different cross-section shapes on the dimensional accuracy, surface quality, processing efficiency and subsurface damage of micro-holes. The results showed that the processing efficiency of micro-holes processed by the micro-spiral electrode is much larger than that machined by the cylindrical electrode. The processing efficiency of micro-holes machined by the micro-spiral electrode with the 200 μm diameter is 17% higher than that by the cylinder electrode of the same diameter processed, and the processing efficiency of micro-holes processed by the micro-spiral electrode with the 300 μm diameter can be increased by 30.56%. The micro-hole reaming machined by the micro-spiral electrode is smaller than that made by the cylindrical electrode, and the quality of the pore wall obtained by the micro-spiral electrode is better than that machined by the cylindrical electrode. The subsurface damage layer of the micro-hole processed by the micro-spiral electrode is continuous and the thickness is smaller than that of the micro-hole processed by the cylindrical electrode.

Key words: micro-spiral electrode; micro-cylinder electrode; micro-hole; CuW70; nickel-based single crystal superalloy

微孔作为一个看似结构简单实则作用巨大的结构,在航空航天、汽车制造、轮机制造、精密和超精密仪器加工等方面得到了广泛的使用.例如航空发动机高压压气机空气导管内的阻尼衬套、汽车发动机喷油嘴、高压涡轮增压机阻尼筒和阻尼环、显微镜的光栅等^[1].微孔由于其直径小、深径比大,而且所加工的材料多为难加工材料,因此微孔的加工稳定性和高效性一直是待解决的难题^[2].

镍基单晶高温合金由于只有一个晶粒不含晶界,相比较常规合金具有更高的强度和耐腐蚀性,

在微孔加工过程中更容易出现孔壁缺陷、尺寸精度低和排屑困难等问题^[3]。目前加工微孔的方法有传统机械钻削、电火花加工 (electric discharge machining, EDM)、电化学腐蚀和激光加工等^[4-5]。其中,电火花加工方法具有非接触性、不存在宏观作用力、不受材料物理性能制约等优势,使其在一些难加工材料的微尺度加工领域具有十分广阔的应用空间^[6-7]。本文主要采用电火花加工方法来实现微细工具电极的制备和微小孔的加工。

采用电火花加工微孔时由于脉冲放电频繁,放电间隙小且废屑多,导致排屑难,加工过程不稳定。目前,进行微孔加工的微细电极主要是圆柱电极和削边电极^[8-9]。例如张雷进行了关于圆柱电极加工深小孔的仿真及实验研究^[10]。Zhao 等采用削边电极在钛合金工件上加工出深径比为 16 的通孔^[11],这是由于削边电极可以减少在加工过程中的废屑堆积,有利于获得稳定的加工状态。微细螺旋电极具有的螺旋结构,提供了废屑排出的通道,减少了废屑堆积的时间,提高了加工稳定性,但其在制备上存在较大的难度。本文主要通过单向走丝电火花线切割的加工方法低成本高效率制备出不同直径尺寸的微细螺旋电极^[12];通过与微细圆柱电极加工微孔实验进行对比,从微孔的尺寸精度、表面质量、加工效率和亚表面损伤等方面综合分析微细螺旋电极的加工性能。

1 实验材料与实验方案

首先利用阿奇夏米尔 CA20 单向走丝电火花线切割机床,结合高精密防水回转机构实现对具有回转结构的零部件加工,所制备出的直径 200 μm 和 300 μm 的微细圆柱电极和螺旋电极如图 1 所示,电极实际直径分别为 200.66 和 308.63 μm ,实际长度分别为 1 471.98 和

1 494.43 μm ,电极材料为铜钨合金。利用所制备的电极在 AQ36Ls 电火花成型机上进行微孔加工实验,每根电极分别连续加工 6 个微孔。微孔加工所用板材为镍基单晶高温合金材料,微孔的深度为 800 μm ,其加工过程如图 2 所示。微孔加工过程划分为粗加工和精加工两道工序,工作介质为火花油,其他加工参数如表 1 所示。通过超景深显微镜对所加工的微孔的尺寸进行检测,并对微孔亚表面损伤层进行测量,通过激光共聚焦显微镜对微孔内表面的形貌和粗糙度进行检测。

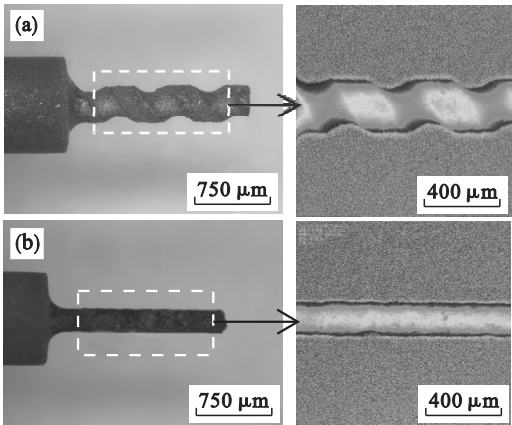


图 1 制备的电极
Fig. 1 Manufactured electrodes

(a)—300 μm 螺旋电极; (b)—200 μm 圆柱电极。

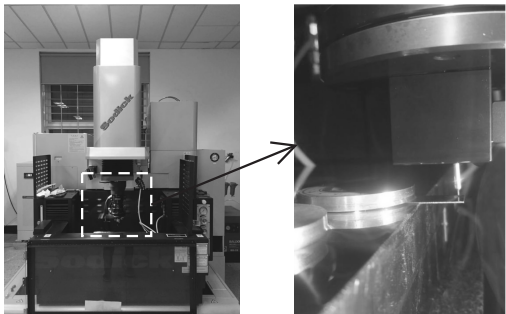


图 2 电火花成型机微孔加工过程
Fig. 2 Micro-hole machining process of EDM machine

表 1 微孔加工实验条件
Table 1 Experimental conditions of micro-hole machining

参数	粗加工	精加工	参数	粗加工	精加工
峰值电流/A	4.6	3.7	脉冲宽度/ μs	2	2
主电压/V	120	120	脉冲间隔/ μs	6	6
伺服电压/V	65	65	跳转速度($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	10	5
跳转上升时间/s	0.08	0.14	跳转加工时间/s	0.13	0.12
电容器容量/ μF	0.007	0.007	电极极性	—	—

2 实验结果与讨论

2.1 微孔的尺寸精度分析

采用超景深显微镜观察并测量出微孔的入口孔直径,进行扩孔量的计算,不同型号电极的各个孔的入口扩孔量如图 3a 和图 3b 所示,为了量化螺旋电极与圆柱电极微孔加工的扩孔量,对各个电极所加工的 6 个微孔的扩孔量取均值,结果见图 3c. 图 4 为 300 μm 直径的螺旋电极和圆柱电极加工的 2 号微孔的二维和三维图.

从图 3 中可以看出,不同直径的螺旋电极所加工的微孔扩孔量均小于圆柱电极,这主要是由

于微细螺旋电极的螺旋结构有助于加工废屑的排出,减少了由于废屑过长时间的停留而导致的二次放电现象,进而减小扩孔量. 此外,计算结果表明,在直径为 300 μm 电极微孔加工中,螺旋电极所加工微孔平均扩孔量较圆柱电极减少 26.913 μm ;直径为 200 μm 时,螺旋电极平均扩孔量减少 13.06 μm . 从图 3c 中可以看到,200 μm 直径螺旋电极所加工微孔平均扩孔量略大于 300 μm 时,原因是随着电极直径的减小,电蚀产物的排出难度增加,虽有螺旋结构可提高排屑能力,但是相比较 300 μm 时 200 μm 螺旋电极排屑能力有所下降,导致多余的放电加工,以至于扩孔量略有增大.

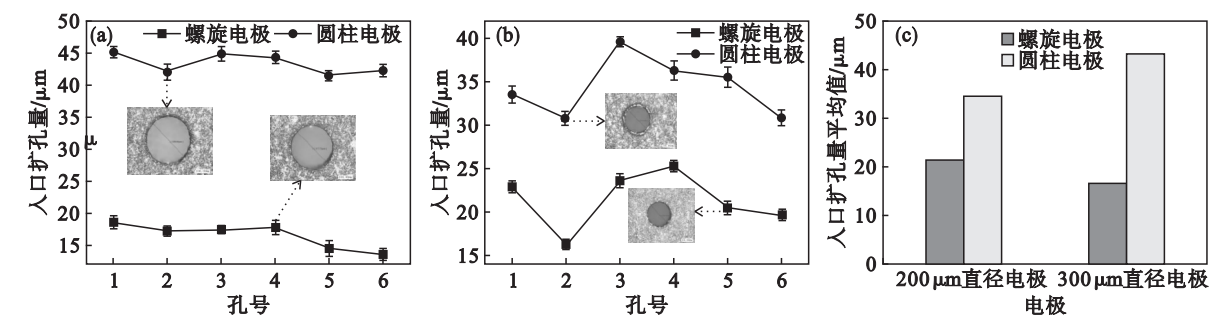


图 3 不同型号电极加工的微孔入口扩孔量
Fig. 3 Reaming of micro-holes machined by different types of electrodes
(a)—电极直径 300 μm ; (b)—电极直径 200 μm ; (c)—扩孔量平均值.

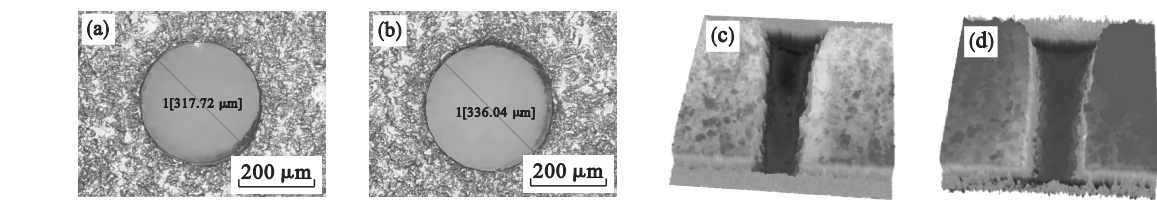


图 4 微孔的二维和三维形貌
Fig. 4 Two-dimensional and three-dimensional topography of micro-holes
(a)—螺旋电极加工的二维微孔; (b)—圆柱电极加工的二维微孔;
(c)—螺旋电极加工的三维微孔; (d)—圆柱电极加工的三维微孔.

2.2 微孔的内表面质量分析

为了观察所加工的微孔内表面质量,利用阿奇夏米尔 CA20 线切割机床将所加工微孔沿直径方向切开,然后利用激光共聚焦显微镜进行表面观察及孔壁的表面粗糙度测量. 通过对微孔表面形貌检测得出各个电极所加工的 6 个孔的孔壁的表面粗糙度 R_a , 结果如图 5 所示,其中微孔内表面部分线轮廓如图 6 所示.

从图 5 中可以看出,同根电极的 6 个孔的 R_a 变化平稳. 在电极直径为 300 μm 时,螺旋电极微

孔加工的粗糙度值要明显小于圆柱电极,计算结果表明,螺旋电极所加工微孔粗糙度平均值为 1.182 μm ,圆柱电极为 1.612 μm . 在电极直径为 200 μm 时,螺旋电极所加工的微孔粗糙度平均值为 1.301 μm ,圆柱电极为 1.318 μm . 综合两种直径电极,螺旋电极加工微孔平均粗糙度值为 1.242 μm ,而圆柱电极为 1.465 μm . 由此可以得出,螺旋结构的存在可以提高电蚀产物的排出效率,使微细螺旋电极加工的微孔的表面粗糙度小于圆柱电极的.

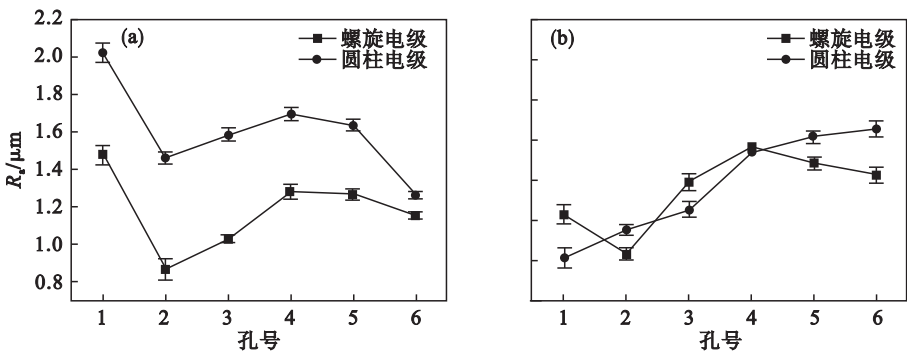


图 5 不同电极微孔加工内表面粗糙度

Fig. 5 Surface roughness of micro-holes machined by different types of electrodes

(a)—电极直径 300 μm ; (b)—电极直径 200 μm .

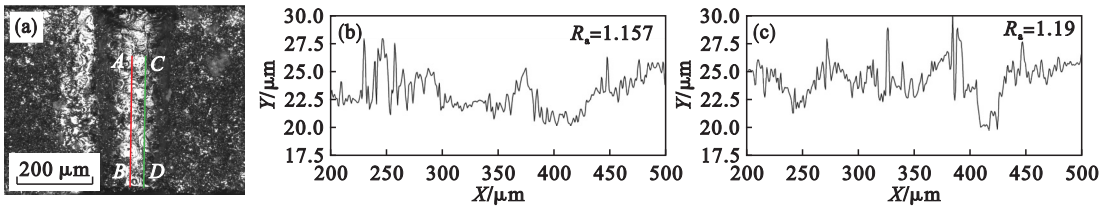


图 6 微孔内表面线轮廓

Fig. 6 Line outline of the inner surface of micro-holes

(a)—微孔剖面; (b)—AB 截面轮廓; (c)—CD 截面轮廓.

2.3 微孔的加工效率分析

不同电极各个微孔的加工时间及平均单微孔加工时间如图 7 所示. 可以看出,不同直径下的微细螺旋电极加工微孔的时间明显低于圆柱电极,这是由于螺旋电极的排屑能力强,减少了排屑过程产生的电弧放电和二次放电现象,有助于加工的稳定进行,从而提升加工效率. 计算结果表明,在电极直径为300 μm 时,相比圆柱电极,螺旋电极的微孔加工效率可提高 30.56%;电极直径为200 μm 时,效率可提高 17%. 此外,从图 7a 中可以看出,螺旋电极在直径为200 μm 时随着加工微孔数量的增加,加工时间有先增加再减小并趋于平稳的趋势;在300 μm 时,加工时间逐渐增大稍有波动后趋于平稳. 这说明螺旋结构在提高加

工效率的同时削弱了电极的耐损耗性,导致螺旋结构排屑能力下降,提高了螺旋电极原有的加工时间,但随着微孔数量的不断增加,电极前端的损耗变大导致微孔整体去除量减小,因而微孔加工时间略有减小. 而圆柱电极的加工时间随着微孔数量的增加而下降并逐渐趋于稳定,分析原因是电极的损耗导致了微孔的入口和出口尺寸差变大,即加工微孔所蚀除的材料越来越少而使加工时间缩短. 随着微孔数量的增加,各个电极的加工时间均趋于平稳,说明电极前端的损耗亦达到了平稳. 在图 7b 中可以看出,200 μm 微孔加工时间要小于 300 μm 微孔的加工时间,主要原因是二者的微孔去除量不同,前者要小于后者,进而其加工时间也小于后者.

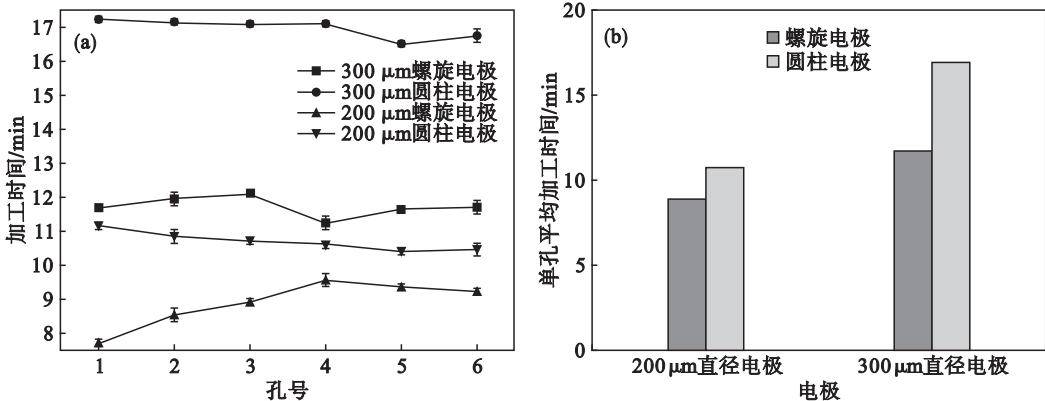


图 7 不同电极微孔加工时间

Fig. 7 Processing time of micro-holes processed by different types of electrodes

(a)—各电极单孔加工时间; (b)—各电极平均加工时间.

2.4 微孔的亚表面损伤分析

工件在进行电火花加工时表面层的组织和成分将发生变化,称为变质层^[13]. 此类损伤将严重影响工件的机械性能和使用寿命. 本文首先将试件制备成检测试样,进行表面研磨并抛光处理,采

用腐蚀液(40 mL $C_3H_8O_3$ + 20 mL HF + 10 mL HNO_3)对抛光表面进行腐蚀,最后用酒精冲洗并用烘干机烘干. 通过超景深显微镜对腐蚀表面进行观察并测量出亚表面损伤层的厚度. 其测量结果如图 8 所示.

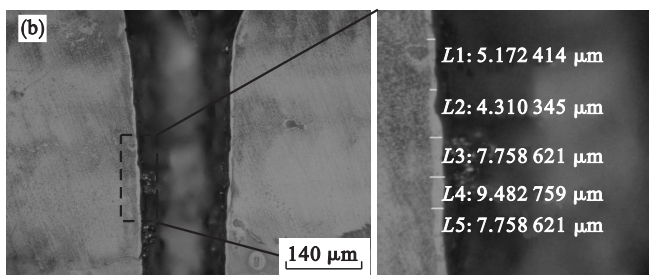
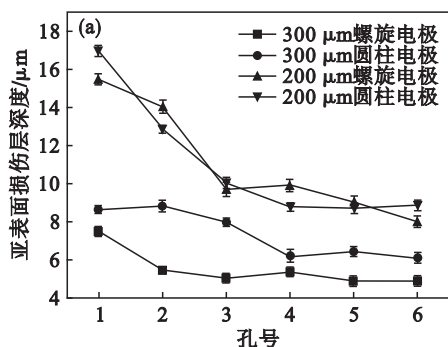


图 8 微孔亚表面损伤层厚度

Fig. 8 Thickness of micro-hole subsurface damage layers

(a)—各个电极加工微孔亚表面损伤层厚度;(b)—200 μm 螺旋电极加工微孔局部损伤层测量值.

根据图 8a 可以看出,直径为 300 μm 的电极加工微孔时,螺旋电极所加工微孔亚表面损伤层小于圆柱电极,计算结果表明,螺旋电极的亚表面损伤层厚度平均为 5.518 μm,圆柱电极的为 7.359 μm. 直径为 200 μm 的螺旋电极加工的微孔的亚表面损伤层厚度平均为 11.029 μm,圆柱电极的为 11.04 μm. 综合两种直径电极,微细螺旋电极所加工的微孔亚表面损伤层平均厚度为 8.274 μm,圆柱电极的为 9.199 μm. 300 μm 直径电极加工微孔的亚表面损伤层厚度小于 200 μm 直径电极加工的微孔,分析原因是随着电极直径的减小,排屑难度增大,而间隙中存留的电蚀产物将导致发生二次放电次数增加,扩大亚表面损伤层深度.

3 结 论

1) 在不同直径电极的微孔加工实验中,螺旋电极的扩孔量要小于圆柱电极. 实验表明,采用直径为 300 μm 的螺旋电极加工镍基单晶高温合金微孔的平均扩孔量较圆柱电极减少 26.913 μm;直径为 200 μm 时,螺旋电极的平均扩孔量减少 13.06 μm.

2) 各个电极所加工的微孔内表面 R_a 值随着微孔数量的增加基本保持稳定. 微细螺旋电极加工的微孔内表面质量好于圆柱电极加工的微孔内表面质量. 实验表明,微细螺旋电极加工的微孔表面粗糙度平均值为 1.242 μm,圆柱电极的为 1.465 μm.

3) 微细螺旋电极的微孔加工效率远大于圆柱电极. 实验表明,直径为 300 μm 的螺旋电极的微孔加工效率较圆柱电极提高 30.56%;直径为 200 μm 螺旋电极微孔的加工效率较圆柱电极提高 17%.

4) 微细螺旋电极加工的微孔亚表面损伤层厚度略小于圆柱电极加工的微孔. 经计算,螺旋电极加工的微孔亚表面损伤层平均厚度为 8.274 μm,圆柱电极的为 9.199 μm.

参考文献:

- [1] Pham D T, Dimov S S, Bigot S, et al. Micro-EDM—recent developments and research issues [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1): 50–57.
- [2] Liu H S, Yan B H, Huang F Y, et al. A study on the characterization of high nickel alloy micro-holes using micro-EDM and their applications [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 169(3): 418–426.
- [3] 王超, 赵军, 周咏辉. 镍基合金螺旋铣孔加工质量研究 [J]. *工具技术*, 2019, 53(1): 51–55.
(Wang Chao, Zhao Jun, Zhou Yong-hui. Study on machining quality of helical milling for nickel-based superalloy [J]. *Tool Engineering*, 2019, 53(1): 51–55.)
- [4] Ferraris E, Castiglioni V, Ceyssens F, et al. EDM drilling of ultra-high aspect ratio micro holes with insulated tools [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2013, 62(1): 191–194.
- [5] Ragavendran U, Ghadai R K, Bhoi A, et al. Sensitivity analysis and optimization of EDM process parameters [J]. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2019, 43(1): 13–25.
- [6] Gong Y D, Sun Y, Wen X L, et al. Experimental study on accuracy and surface quality of TC2 in LS-WEDM multiple cuts [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2016, 38(8): 2421–2433.

(下转第 107 页)