

# 难加工材料大深径比微小孔高效加工技术研究

刘小勇<sup>1</sup> 王海<sup>2</sup> 甄宏伟<sup>2</sup> 葛丹丹<sup>2</sup> 王春龙<sup>2</sup> 李继鹏<sup>2</sup> 陈济轮<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军火箭军装备部驻北京地区第一军事代表室, 北京 100076;

2. 首都航天机械有限公司, 北京 100076)



**摘要:** 针对 GH4169 高温合金、TC4 钛合金两种难加工材料大深径比微小孔加工及加工效率低的难题, 开展了微细电火花加工及超声-微细电火花复合加工技术应用研究。通过优化相应的加工参数, 摸索出了大深径比微小孔高效率加工工艺条件, 微小孔的加工效率高、质量优良。

**关键词:** 微细电火花加工; 超声加工; GH4169 镍基高温合金; TC4 钛合金

## Research on High Efficiency Machining Technology of Micro Hole with High Depth-diameter Ratio for Difficult to Machine Materials

Liu Xiaoyong<sup>1</sup> Wang Hai<sup>2</sup> Zhen Hongwei<sup>2</sup> Ge Dandan<sup>2</sup> Wang Chunlong<sup>2</sup> Li Jipeng<sup>2</sup> Chen Jilun<sup>2</sup>

(1. First Military Representative Office of CPLA Rocket Army Equipment Department in Beijing Area, Beijing 100076;

2. Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076)

**Abstract:** The paper gives a description of research on micro electric discharge machining (Micro-EDM) and ultrasonic micro-EDM compound technology in handling GH4169 superalloy and TC4 titanium alloy to fabricate micro hole with high depth-diameter ratio and improve production efficiency. The process window is determined by optimizing relevant parameters and high quality and efficiency are achieved as a consequence.

**Key words:** micro electric discharge machining (Micro-EDM); ultrasonic machining; GH4169 superalloy; TC4 titanium alloy

### 1 引言

随着航天装备技术的不断发展, 装备对分系统小型化、轻质化、快响应、长寿命的要求也越来越高。由于钛合金有较好的比强度和耐蚀性, 镍基高温合金有较好的高温力学性能稳定性, 轨姿控发动机的部组件越来越多地采用钛合金和镍基高温合金材料的微小孔结构, 最小孔径可达  $\phi 0.03\text{mm}$  以下。

镍基高温合金和钛合金是典型的难加工材料, 其抗拉强度和硬度都较高, 尤其是经过时效强化处理后镍基高温合金, 抗拉强度更高。在这类难加工材料上采用常规的机械加工方法高效加工大深径比的微小孔, 技术难度更大。机械加工小孔时, 基本上都须选

用特制的钻头, 同时还需选用精密的加工机床。除了上述硬件保证条件外, 对操作人员的技能要求也比较苛刻。即使这样还明显存在加工效率很低、产品合格率低等缺点, 甚至不可实现加工。

与一般的电火花加工技术相比, 微细电火花加工技术采用更小的放电规准, 最小放电脉冲当量可达  $\leq 10^{-7}\text{J}$ , 具有与被加工材料的硬度和强度无关、无切削力等优点, 特别适合于高强度、高硬度、高韧性、高脆性等金属材料的加工, 在微小孔及微结构加工方面, 具有其它加工方法难以比拟的优势。

### 2 国内外研究现状

作者简介: 刘小勇 (1980), 硕士, 航天工程专业; 研究方向: 航天产品特种加工。

收稿日期: 2019-11-29

日本、比利时、瑞士等国家有很多特种微细加工的研究成果并进入工程应用的实例。日本东京大学发明的线电极电火花磨削技术,可加工出  $\Phi 2.5\mu\text{m}$  微细轴、 $\Phi 5\mu\text{m}$  微小孔。日本三菱电机利用微细电火花加工技术成功地制作出了齿顶圆直径仅为  $\Phi 0.2\text{mm}$  的小齿轮。比利时鲁文大学利用微细电火花加工方法,开展了大量微型机械的加工研究,在钛合金 TC4 上可加工出  $42\mu\text{m}$  宽、 $1\text{mm}$  深的微细槽。

国际上比较著名的电加工设备生产厂家,如日本沙迪克公司、瑞士阿奇夏米尔公司分别采用自行研制微细电火花加工设备,在超硬金属材料上进行了微小孔试验, $\Phi 0.02\text{mm}$  的微小孔深径比大于 15,平均加工速度可达  $0.04\text{mm}/\text{min}$  以上; $\Phi 0.1\text{mm}$  的微小孔深径比大于 50,平均加工速度可达  $0.8\text{mm}/\text{min}$  以上。

国内高等院校方面,哈尔滨工业大学、清华大学、大连理工大学等均开展了微细电火花加工工艺研究工作。在精微脉冲电源、伺服控制技术、微细电极制备、工件加工等方面取得了良好的应用效果。

### 3 研究内容

针对镍基高温合金 GH4169、钛合金 TC4 难加工材料,从电火花微细加工、超声-微细电火花复合加工两个方面开展研究,提高微小孔的深径比及加工效率,掌握难加工材料大深径比微小孔高效加工技术。

#### 3.1 试验设备及条件

试验设备: MEDM-150 微细电火花加工设备;浸入式超声波发生器。

试验电极材料: a. 直径为  $\Phi 2\text{mm}$  的 W1 纯钨棒(钨含量 99.95%); b. W1 纯钨棒靶块; c. 镍基高温合金 GH4169 试样; d. 钛合金 TC4 试样。

#### 3.2 大长径比微小电极制备方法研究

因为微小结构或微小孔的尺寸微小,微细电火花加工所用的工具电极尺寸就更加微小,因此实际加工

过程中,不可能像常规方法那样装夹或二次装夹工具电极。要得到几十微米至几百微米量级的微小孔,就必须制备比微小孔孔径更小的电极。

针对不同的加工对象,本文提出了“中转速半精加工-低转速精加工反拷法”的微细电极制备方法,以提高微细电极的长径比和制备效率。

用于微小电极制备的超高频纳秒级脉冲电源最小峰值电流为  $20\text{mA}$ ,单脉冲最小输出能量可达到  $10^{-7}\text{J}$ ,有利于制备高精度的微小电极。

a. 中转速半精加工反拷法: 采用中转速半精加工反拷法的目的是大幅提高微小电极的制备效率。在微小电极中转速半精加工反拷过程中,可以把烧蚀产物及时排出放电加工区,有利于反拷加工的持续稳定进行。中转速半精加工的主轴转速可以控制在  $600\text{r}/\text{min}$  以内。通过中转速半精加工反拷可以把直径为  $\Phi 1\text{mm}$  的 W1 纯钨棒快速地调整到直径  $\Phi \leq 0.2\text{mm}$ ,电极圆柱度  $\leq \Phi 8\mu\text{m}$ ,长径比  $\geq 60$ 。

b. 低转速精加工反拷法: 采用低转速精加工反拷法的目的是获得圆柱度更好的微小电极。由于微小电极的刚度较弱,同时对圆柱度要求很高,因此对电极进行反拷加工时,电极转速越大,产生的离心力也越大。离心力越大,微小电极的圆柱度也越差,无法得到圆柱度更好的电极。采用电极低速旋转的主轴转速可以控制在  $150\text{r}/\text{min}$  以内。可大幅降低电极旋转时的离心力,有利于提高微小电极的圆柱度,低转速精加工反拷法制备电极的圆柱度一般需要  $\leq \Phi 3\mu\text{m}$ 、长径比  $\geq 25$ 。

#### 3.3 基于 GH4169、TC4 材料特性的微细电火花放电规范研究

对于高温合金 GH4169、钛合金 TC4 等难加工材料独特的物理特性,研究其微细电火花加工过程中,放电脉冲占空比、开路电压、峰值电流对等加工时间、电极损耗的影响,摸索难加工材料微小孔微细电火花加工工艺条件,见表 1、表 2。

表1 GH4169材料微细放电规范的试验效果

| 脉冲占空比/% | 峰值电流档位/档 | 开路电压/V | 伺服电压/V | 加工时间/min | 电极损耗/mm | 电极损耗率/% |
|---------|----------|--------|--------|----------|---------|---------|
| 50      | 15       | 200    | 45     | 3.5      | 0.55    | 46      |
| 50      | 20       | 200    | 45     | 4.5      | 0.45    | 34      |

表2 TC4材料微细放电规范的试验效果

| 脉冲占空比/% | 峰值电流档位/档 | 开路电压/V | 伺服电压/V | 加工时间/min | 电极损耗/mm | 电极损耗率/% |
|---------|----------|--------|--------|----------|---------|---------|
| 30      | 5        | 200    | 45     | 3.5      | 1.5     | 115     |
| 50      | 5        | 200    | 45     | 4.5      | 0.4     | 25      |

与高温合金 GH4169 相比,要实现钛合金 TC4 材料稳定的微细电火花加工,需要增大放电间隙,有利于电蚀产物排出,避免钛合金表面碳化。

通过一系列微细电火花工艺试验,可以得到镍基高温合金 GH4169、钛合金 TC4 材料的微细电火花放电规范。

### 3.4 GH4169、TC4 大深径比微小孔电火花加工研究

根据上述的研究结果,在镍基高温合金 GH4169、钛合金 TC4 等材料的试样上,分别对名义直径为  $\Phi 0.10\text{mm}$ 、 $\Phi 0.04\text{mm}$  微小孔的进行加工试验,试验结果如表 3~表 6。

表3 GH4169材料 $\Phi 0.10\text{mm}$ 微小孔试验效果

| 放电规范 | 电极直径/mm      | 目标孔径/mm     | 加工时间/min | 实测孔径范围/mm                    | 深径比   |
|------|--------------|-------------|----------|------------------------------|-------|
| 规范 A | $\Phi 0.084$ | $\Phi 0.10$ | 45       | $\Phi 0.101\sim\Phi 0.103$   | 10~12 |
| 规范 B | $\Phi 0.082$ | $\Phi 0.10$ | 60       | $\Phi 0.0958\sim\Phi 0.1021$ | 10~13 |

表4 GH4169材料 $\Phi 0.04\text{mm}$ 微小孔试验效果

| 放电规范 | 电极直径/mm      | 目标孔径/mm     | 加工时间/min | 实测孔径范围/mm                    | 深径比  |
|------|--------------|-------------|----------|------------------------------|------|
| 规范 A | $\Phi 0.026$ | $\Phi 0.04$ | 45       | $\Phi 0.0365\sim\Phi 0.0398$ | 8~10 |
| 规范 B | $\Phi 0.028$ | $\Phi 0.04$ | 60       | $\Phi 0.0377\sim\Phi 0.0401$ | 8~10 |

表5 TC4材料 $\Phi 0.10\text{mm}$ 微小孔试验效果

| 放电规范 | 电极直径/mm      | 目标孔径/mm     | 加工时间/min | 实测孔径范围/mm                    | 深径比   |
|------|--------------|-------------|----------|------------------------------|-------|
| 规范 A | $\Phi 0.084$ | $\Phi 0.10$ | 45       | $\Phi 0.0965\sim\Phi 0.1037$ | 10~12 |
| 规范 B | $\Phi 0.082$ | $\Phi 0.10$ | 60       | $\Phi 0.0942\sim\Phi 0.1021$ | 10~13 |

表6 TC4材料 $\Phi 0.04\text{mm}$ 微小孔试验效果

| 放电规范 | 电极直径/mm      | 目标孔径/mm     | 加工时间/min | 实测孔径范围/mm                    | 深径比  |
|------|--------------|-------------|----------|------------------------------|------|
| 规范 A | $\Phi 0.026$ | $\Phi 0.04$ | 45       | $\Phi 0.0363\sim\Phi 0.0394$ | 8~10 |
| 规范 B | $\Phi 0.028$ | $\Phi 0.04$ | 60       | $\Phi 0.0407\sim\Phi 0.0393$ | 8~10 |

从试验结果可以看出,微细电火花加工镍基高温合金 GH4169、钛合金 TC4 两种材料,均能得到很高的微小孔精工精度; $\Phi 0.04\text{mm}$  左右微小孔的深径比一般不大于 10; $\Phi 0.10\text{mm}$  左右微小孔的深径比一般不大于 15。

### 3.5 GH4169、TC4 大深径比微小孔超声-电火花复合高效加工研究

一般情况下微细电火花加工的放电间隙在数微米到数十微米之间,当深径比较大时,容易在加工区产生积碳现象或二次放电现象,大大地降低了加工效率,

也无法进一步提高深径比。

超声-微细电火花复合加工是超声波的空化和声场辐射力的作用,增大了放电区蚀除颗粒的碰撞和摩擦。利用高频、小振幅超声振动的泵吸作用,有效排除微小加工间隙内的放电产物,可大幅提高深径比和加工效率。

本试验采用输出超声功率可调、主频数十千赫兹、最大功率数十瓦的浸入式超声发生器,与 MEDM-150 微细电火花加工设备进行适配,开展超声-电火花复合高效加工试验,试验效果见表 7、表 8。

表7 GH4169超声-电火花复合加工微小孔深径比试验效果

| 目标孔径/mm     | 施加超声 | 加工时间/min | 实测孔径范围/mm                    | 深径比         |
|-------------|------|----------|------------------------------|-------------|
| $\Phi 0.1$  | 是    | 25       | $\Phi 0.101\sim\Phi 0.105$   | 17.14~18.26 |
| $\Phi 0.04$ | 是    | 30       | $\Phi 0.0416\sim\Phi 0.0464$ | 15.07~16.23 |

表8 TC4超声-电火花复合加工微小孔深径比试验效果

| 目标孔径/mm     | 施加超声 | 加工时间/min | 实测孔径范围/mm                    | 深径比         |
|-------------|------|----------|------------------------------|-------------|
| $\Phi 0.1$  | 是    | 25       | $\Phi 0.107\sim\Phi 0.098$   | 16.87~18.17 |
| $\Phi 0.04$ | 是    | 30       | $\Phi 0.0435\sim\Phi 0.0483$ | 15.23~16.53 |

