

# 高温合金 IN718 上气膜冷却孔 电火花加工试验

郭永丰, 张国伟, 王 力, 郭本生  
(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 针对高温合金 IN718 上  $\phi 0.5$  mm 气膜冷却孔的加工, 采用煤油中旋转电极内冲液电火花成型加工方法, 利用正交试验设计方法对试验进行设计分析, 分析峰值电流、脉宽、占空比和冲液压强 4 个因素对材料去除率和电极相对损耗的影响, 基于正交试验结果建立综合评分公式, 选择最优加工参数。研究结果表明, 峰值电流对材料去除率的影响最明显, 其次为冲液压强和占空比, 脉宽对材料去除率的影响很小; 峰值电流对电极相对损耗的影响最明显, 其次为冲液压强, 占空比和脉宽对电极相对损耗的影响很小; 最优的加工参数峰值电流为 8 A、脉宽为 130  $\mu$ s、占空比为 0.35、冲液压强为 5 MPa, 对该参数进行加工试验研究, 与分析结果一致。

**关 键 词:** 高温合金 IN718; 电火花成型加工; 正交试验设计; 材料去除率; 电极相对损耗;  
综合评分法

**中图分类号:** V261; TG661 **文献标志码:** A

## Experiment on electric discharge machining of cooling holes in superalloy IN718

GUO Yong-feng, ZHANG Guo-wei,  
WANG Li, GUO Ben-sheng

(School of Mechatronics Engineering,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Processing methods of electrical discharge machining (EDM) using inner jet liquid rotating electrodes under the kerosene liquid about  $\phi 0.5$  mm small holes on superalloy IN718 was proposed. The effects of process parameters of EDM, such as peak current, pulse on time, duty cycle and hydraulic pressure, on the material removal rate and the electrode relative-wear were studied using orthogonal design. Comprehensive formula about the material removal rate and the electrode relative-wear based on orthogonal experiment was established to choose the best processing parameters. The analysis of the results shows that the influence of peak current on the material removal is most obvious followed by the hydraulic pressure and duty cycle. The influence of pulse on time on the material removal rate is not significant; the influence of peak current on the electrode relative-wear is most obvious, followed by the hydraulic pressure. The influences of the pulse on time and the duty cycle on the electrode relative-wear are not significant; the optimization parameter group is the peak current 8 A, pulse on time 130  $\mu$ s, duty cycle 0.35, and hydraulic pressure 5 MPa. This is the

optimum parameter group obtained by experimental study.

**Key words:** superalloy IN718; electrical discharge machining; orthogonal experimental design; material removal rate; electrode relative-wear; synthetical scored method

高温合金由于具有较高的拉伸强度和屈服强度,并且在高温下承受较高应力后仍然具有较好的使用性能,被应用于具有较高工作温度航空发动机涡轮叶片和燃烧室机匣等部位<sup>[1-2]</sup>. 目前,航空发动机的气膜冷却已成为应用最为广泛的冷却方式之一<sup>[3]</sup>. 对于气膜冷却孔的加工,由于镍基高温合金机械加工时具有切削力大、切削温度高、加工硬化、刀具磨损和金属亲和力强等特点,使得机械加工性能较差<sup>[4-5]</sup>;且气膜冷却孔的孔径在 0.2~0.8 mm 之间,使得机械加工更加困难,甚至无法实现加工. 电火花加工(EDM)是在工件和工具电极间通过脉冲性火花放电来蚀除工件的一种加工方法,因此不受工件材料强度、硬度等性能的影响,且加工形状尺寸与工具电极有关,因此被广泛应用于难加工材料和复杂结构件<sup>[6-9]</sup>.

对于 IN718 镍基高温合金电火花加工的研究,文献[10]对 IN718 镍基高温合金电火花加工表面完整性进行了初步研究,研究了峰值电流和脉冲宽度对加工表面粗糙度和微观形貌的影响. 文献[11]研究了不同加工条件(电解加工和电火花加工)对高温合金 IN718 表面质量的影响,并研究电解加工和电火花加工中影响高温合金表面质量的主要因素及其变化规律. 文献[12]采用 3 mm 的紫铜管状电极对高温合金 IN718 进行电火花加工试验研究,研究电参数对深孔加工的影响. 文献[13]进行了混粉电火花加工方法(AEDM)加工高温合金 IN718 的研究,研究了颗粒尺寸和浓度对电极损耗、材料去除率和表面粗糙度的影响. 文献[14]进行了高温合金 IN718 大电流密度电火花磨削加工的研究,研究发现电流为 150 A 和 920 A 时,重熔层厚度具有微小的区别;裂纹不仅存在于重熔层中,且扩散到了基体材料. 文献[15]利用灰关联法对微细电火花加工高温合金 IN718 的综合性能进行优化,以提高高温合金电火花加工质量.

综上所述,针对高温合金 IN718 小孔的电火花加工,目前国内外没有通过综合评分法进行最优参数的优选. 本文进行煤油中旋转电极内冲液

电火花加工高温合金 IN718 的试验研究,通过正交试验设计来研究峰值电流( $I_p$ )、脉宽( $\tau_{on}$ )、占空比( $\varphi$ )和冲液压强( $p$ )对材料去除率和电极相对损耗的影响程度和影响规律,并建立材料去除率和电极相对损耗的综合评分公式,对试验结果进行综合评分,将各个影响因素的最优参数进行组合,选择最优的参数组,并通过试验对选择的最优参数进行验证.

1 试验原理

由于电火花加工中,油基工作液相对于水基工作液介电性强,放电间隙小,具有较好的加工精度,因此采用煤油作为工作液进行试验研究. 为了防止煤油燃烧,加工试验在煤油液面之下进行,并且采用旋转电极内冲液的形式,该加工方式可以改善排屑效果,加快材料去除率,提高煤油中电火花的加工效率,且管状电极沿 Z 轴向下进给的同时通过电机带动沿着自身轴线旋转,可以提高加工孔的圆度( $R$ )<sup>[16-18]</sup>. 图 1 为不同峰值电流加工条件下电极旋转与不旋转加工孔的圆度,其加工参数脉宽为 30  $\mu$ s、占空比为 0.45、冲液压强为 5 MPa. 由图 1 可知,在不同峰值电流加工条件下,电极旋转加工孔的圆度要优于电极不旋转加工孔的圆度,随着峰值电流的增大,两者圆度的差值逐渐减小. 加工原理图如图 2 所示.

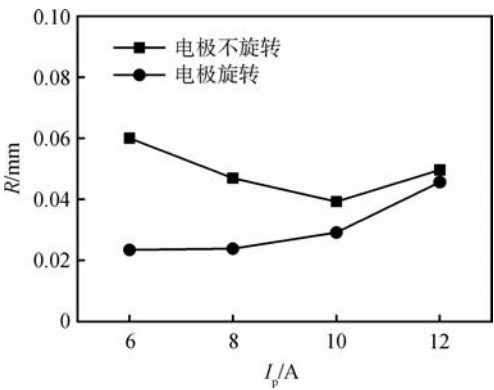


图 1 电极旋转与不旋转加工孔的圆度  
Fig. 1 Roundness of the holes using rotating electrodes and not rotating electrodes

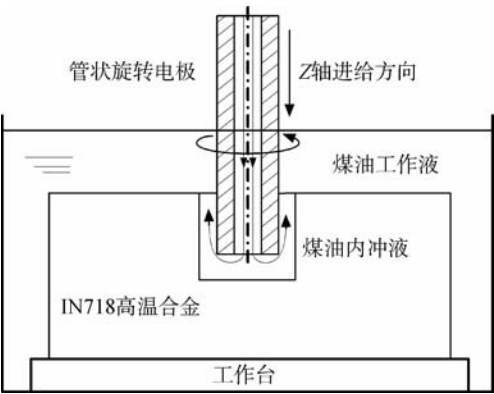


图 2 煤油中旋转电极内冲液电火花加工原理

Fig.2 Principle of EDM using inner jet liquid rotating electrodes under the kerosene liquid

2 试验方案及试验结果

试验基础平台为冬庆 DF7140 电火花成形加工机床,电极选用  $\phi 0.5\text{ mm}$  的黄铜管状电极,其内孔直径为  $\phi 0.25\text{ mm}$ . 自动进给调节系统根据间隙放电状态,通过对加工过程中的电极进给速度进行实时调节,使加工过程处于稳定的加工状态. 电极旋转速度为  $100\text{ r/min}$  时加工稳定性较好,加工孔圆度较小,且继续提高电极的转速对材料去除率和电极相对损耗的变化影响不大,因此电极绕 Z 向的转速选择  $100\text{ r/min}$ . 设计 4 因素 4 水平正交试验,4 因素为峰值电流、脉宽、占空比和冲液压强,在单因素试验的基础上,确定正交试验各因素水平的选择范围,以此选择对应的 4 个水平值. 表 1 为因素水平表.

表 1 因素水平表

Table 1 Orthogonal factor level table

| 水平 | 因素             |                         |        |                |
|----|----------------|-------------------------|--------|----------------|
|    | $I_p/\text{A}$ | $\tau_{on}/\mu\text{s}$ | $\psi$ | $p/\text{MPa}$ |
| 1  | 6              | 10                      | 0.35   | 1              |
| 2  | 8              | 30                      | 0.45   | 3              |
| 3  | 10             | 60                      | 0.55   | 5              |
| 4  | 12             | 130                     | 0.65   | 7              |

试验所选用的正交试验表为  $L_{16}(4^5)$ , 其中第 5 列为误差列,试验结果为材料去除率、电极相对损耗和综合评分值. 加工结束后,加工时间通过机床工作界面显示并将记录,电极的损耗长度通过加工后在孔边缘靠模校正获得,材料去除率和电极相对损耗分别通过式(1)和式(2)计算得到.

$$v = \frac{D^2 \pi h}{4t} \tag{1}$$

$$\theta = \frac{4(r^2 - r_0^2)L}{D^2 h} \tag{2}$$

式中  $v$  为材料去除率; $r$  为管状电极外圆半径; $D$  为加工孔直径; $h$  为加工深度; $\theta$  为电极相对损耗; $L$  为电极损耗长度; $r_0$  为管状电极内孔半径.

针对电极相对损耗和材料去除率两个指标选择最佳的电参数,需要对试验结果进行综合评分,以确定最优的试验结果. 将材料去除率和电极相对损耗的总分分别设为 100 分,离最优结果越近分数越高. 因此得到材料去除率和电极相对损耗分值表达式为

$$Z_v = \frac{100(v - v_{\min})}{v_{\max} - v_{\min}} \tag{3}$$

$$Z_\theta = \frac{100(\theta_{\max} - \theta)}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \tag{4}$$

综合评分为材料去除率与电极相对损耗分数之和,因此所建立的综合评分表达式如式(5)所示

$$Z = 100 \times \frac{(v_{\max} - v_{\min})(\theta_{\max} - \theta)W_\theta + (\theta_{\max} - \theta_{\min})(v - v_{\min})W_v}{(\theta_{\max} - \theta_{\min})(v_{\max} - v_{\min})} \tag{5}$$

式中  $Z_v$  为材料去除率分值; $Z_\theta$  为电极相对损耗分值; $Z$  为综合评分值; $v_{\max}$  为材料去除率最大值; $v_{\min}$  为材料去除率最小值; $W_v$  为材料去除率系数; $W_\theta$  为电极相对损耗系数; $\theta_{\max}$  为电极相对损耗最大值; $\theta_{\min}$  为电极相对损耗最小值.

表 2 为正交试验设计及结果,从试验结果可知,第 16 组试验的材料去除率最高,为  $0.93\text{ mm}^3/\text{min}$ ,第 1 组试验材料去除率最低,为  $0.048\text{ mm}^3/\text{min}$ . 第 2 组试验和第 3 组试验具有最低的电极相对损耗,同为 77%,但第 3 组试验的材料去除率高于第 2 组试验,第 14 组试验的电极相对损耗最高,为 135%.

航空发动机涡轮叶片每个叶片具有数十至数百个气膜冷却孔,由于电极损耗过大导致频繁的更换电极会影响涡轮叶片上气膜孔加工的精度,且每次更换电极需要在涡轮叶片曲面工件上进行电极的装夹、校正和对刀,影响了加工效率. 黄铜管电极具有较快的材料去除率,但电极相对损耗很大,图 3 为黄铜电极与紫铜电极电火花加工高温合金的材料去除率和电极相对损耗对比曲线,由图 3 可知,黄铜管电极的加工速度和电极相对损耗都远大于紫铜管电极. 因此降低黄铜管状电极的电极损耗比提高材料去除率更加重要,综合考虑,将材料去除率系数  $W_v$  和电极相对损耗系数  $W_\theta$  分别设为 0.35 和 0.65. 将其系数带入公式

表 2 试验设计与结果

Table 2 Experimental design and results

| 序号 | 因素及水平   |                   |        |         | 试验结果 |                  |             |      |
|----|---------|-------------------|--------|---------|------|------------------|-------------|------|
|    | $I_p/A$ | $\tau_{on}/\mu s$ | $\psi$ | $p/MPa$ | 误差列  | $\nu/(mm^3/min)$ | $\theta/\%$ | $Z$  |
| 1  | 6       | 10                | 0.35   | 1       | 1    | 0.048            | 100         | 39.2 |
| 2  | 6       | 30                | 0.45   | 3       | 2    | 0.119            | 77          | 67.8 |
| 3  | 6       | 60                | 0.55   | 5       | 3    | 0.311            | 77          | 75.4 |
| 4  | 6       | 130               | 0.65   | 7       | 4    | 0.400            | 98          | 55.4 |
| 5  | 8       | 10                | 0.45   | 5       | 4    | 0.297            | 83          | 68.2 |
| 6  | 8       | 30                | 0.35   | 7       | 3    | 0.430            | 81          | 75.7 |
| 7  | 8       | 60                | 0.65   | 1       | 2    | 0.268            | 102         | 45.7 |
| 8  | 8       | 130               | 0.55   | 3       | 1    | 0.426            | 87          | 68.8 |
| 9  | 10      | 10                | 0.55   | 7       | 2    | 0.228            | 91          | 56.5 |
| 10 | 10      | 30                | 0.65   | 5       | 1    | 0.635            | 101         | 61.4 |
| 11 | 10      | 60                | 0.35   | 3       | 4    | 0.508            | 110         | 46.3 |
| 12 | 10      | 130               | 0.45   | 1       | 3    | 0.437            | 120         | 32.2 |
| 13 | 12      | 10                | 0.65   | 3       | 3    | 0.485            | 128         | 25.2 |
| 14 | 12      | 30                | 0.55   | 1       | 4    | 0.561            | 135         | 20.4 |
| 15 | 12      | 60                | 0.45   | 7       | 1    | 0.810            | 104         | 65.0 |
| 16 | 12      | 130               | 0.35   | 5       | 2    | 0.930            | 96          | 78.7 |

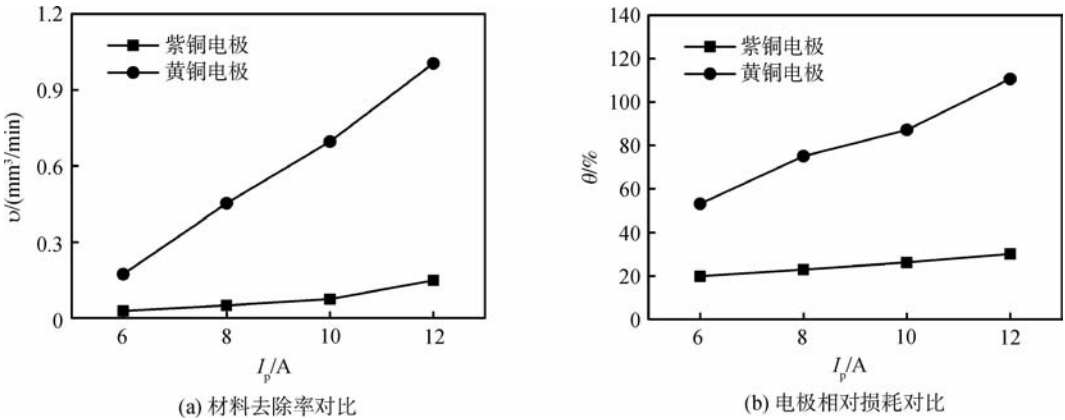


图 3 黄铜电极与紫铜电极加工试验结果对比

Fig. 3 Comparison of experimental results of machining using brass electrode and copper electrode

(5)得到试验对应的综合评分值如表 2 所示,从表中可知,第 16 组试验的综合评分值最高,为 78.7 分.

3 试验分析

3.1 材料去除率分析

表 3 为各因素针对材料去除率的均值和极差,材料去除率最快的参数选择方案电流为 12

A、脉宽为 130  $\mu s$ 、占空比为 0.35、冲液压强为 5 MPa. 从极差数值判断各因素对材料去除率的影响程度,极差值越大则说明该参数更容易影响试验结果. 各因素对材料去除率的影响程度,从大到小依次为峰值电流、脉宽、冲液压强、占空比. 其中,脉宽和冲液压强对材料去除率的影响比较接近,极差分别为 0.284 和 0.214,占空比对材料去除率的影响非常小,其极差值为 0.097.

表 3 材料去除率极差分析

Table 3 Range analysis for electrode relative-wear

| 均值 | 材料去除率/(mm <sup>3</sup> /min) |             |        |       |
|----|------------------------------|-------------|--------|-------|
|    | $I_p$                        | $\tau_{on}$ | $\psi$ | $p$   |
| 1  | 0.220                        | 0.264       | 0.479  | 0.329 |
| 2  | 0.355                        | 0.436       | 0.416  | 0.384 |
| 3  | 0.452                        | 0.474       | 0.382  | 0.543 |
| 4  | 0.697                        | 0.548       | 0.447  | 0.467 |
| 极差 | 0.477                        | 0.284       | 0.097  | 0.214 |

由表 4 可知,峰值电流的  $F$  值为 25.6,是 4 因素  $F$  值中最高值,直观分析和方差分析同时说明,峰值电流对于材料去除率的影响最大.图 4 为各因素对材料去除率的影响规律,由图 4 可知,随着峰值电流的增大,材料去除率逐渐增大,并且呈近似线性关系.这是由于电火花加工过程中,间隙电压变化较小,单个脉冲放电能量随峰值电流和脉宽的增加呈近似线性增加,而放电能量增大可以蚀除更多的材料.

由表 4 可知,脉宽的  $F$  值为 9.1,对材料去除率的影响程度仅次于峰值电流,这与表 3 中极差分析的结果相同.由图 4 可知,材料去除率随脉宽的增加而增大,当脉宽高于  $30\text{ }\mu\text{s}$  时,材料去除率随脉宽的增加增大的较慢,而当脉宽较小时( $10\text{ }\mu\text{s}$ ),材料去除率随脉宽的增加增大的较快.

由表 4 可知,占空比对材料去除率的影响较小,其  $F$  值为 1.1,与误差列的  $F$  值相当.因此其规律受到其他因素的影响较明显,在正交试验中对其规律分析没有意义.

由表 4 可知,冲液压强的  $F$  值为 5.6,其对材料去除率的影响低于脉宽,与表 3 极差分析结果一致.从图 4 中可以看出,随着冲液压强的增大,材料去除率先增大后减小,当冲液压强为  $5\text{ MPa}$

表 4 材料去除率方差分析

Table 4 Analysis of variance for material removal rate

| 因素          | 偏差平方和 | 自由度 | $F$ 值 | $F$ 临界值 | 显著性 |
|-------------|-------|-----|-------|---------|-----|
| $I_p$       | 0.486 | 3   | 25.6  | 5.39    | *   |
| $\tau_{on}$ | 0.173 | 3   | 9.1   | 5.39    | *   |
| $\psi$      | 0.021 | 3   | 1.1   | 5.39    |     |
| $p$         | 0.106 | 3   | 5.6   | 5.39    | *   |
| 误差列         | 0.019 | 3   | 1.0   | 5.39    |     |
| 误差          | 0.02  | 3   |       |         |     |

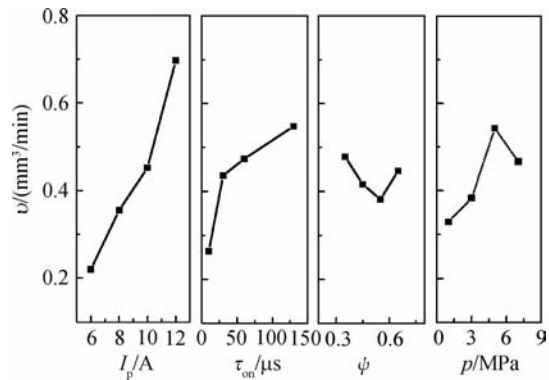


图 4 各因素对材料去除率的影响

Fig. 4 Effects of input parameters associated with material removal rate

时,材料去除率最大.这是由于随着冲液压强的增加,放电间隙的冲液效果逐渐变好,有更多的放电产物可以排出放电间隙,提高材料去除率.但当冲液压强继续增加,使电极的稳定性变差,导致材料去除率的降低.

3.2 电极相对损耗分析

表 5 为各因素对电极相对损耗的均值和极差,电极相对损耗最低的因素选择方案电流为  $8\text{ A}$ 、脉宽为  $60\text{ }\mu\text{s}$ 、占空比为  $0.45$ 、冲液压强为  $5\text{ MPa}$ .从极差值可知,各个因素对电极相对损耗的影响程度从大到小依次为峰值电流、冲液压强、占空比、脉宽.脉宽对电极相对损耗的影响很小,极差值为  $2.475$ .

表 5 电极相对损耗极差分析

Table 5 Range analysis for electrode relative-wear

| 均值 | 电极相对损耗/% |             |        |       |
|----|----------|-------------|--------|-------|
|    | $I_p$    | $\tau_{on}$ | $\psi$ | $p$   |
| 1  | 88.4     | 101.0       | 97.5   | 114.8 |
| 2  | 88.9     | 99.0        | 96.4   | 100.7 |
| 3  | 106.0    | 98.5        | 97.6   | 89.9  |
| 4  | 116.0    | 100.7       | 107.7  | 93.8  |
| 极差 | 27.6     | 2.475       | 11.2   | 25.0  |

由表 6 可知电流对电极相对损耗影响的  $F$  值为 3.33,为各影响因素的最大值,这说明电流是对电极相对损耗影响最大的因素.从图 5 可以看出,随着电流的增大,电极相对损耗依次增大,从  $6\sim 8\text{ A}$  时,电极相对损耗随着电流的增大增加的较慢,当电流超过  $8\text{ A}$  后,电极相对损耗随着电流的增大快速增加.

表 6 电极相对损耗方差分析

Table 6 Analysis of Variance for electrode relative-wear

| 因素          | 偏差平方和 | 自由度 | F 值   | F 临界值 | 显著性 |
|-------------|-------|-----|-------|-------|-----|
| $I_p$       | 3 192 | 3   | 3. 33 | 5. 39 |     |
| $\tau_{on}$ | 108   | 3   | 0. 11 | 5. 39 |     |
| $\psi$      | 350   | 3   | 0. 37 | 5. 39 |     |
| $p$         | 2 372 | 3   | 2. 48 | 5. 39 |     |
| 误差列         | 958   | 3   | 1. 00 | 5. 39 |     |
| 误差          | 958   | 3   |       |       |     |

由表 6 可知,脉宽和占空比对电极相对损耗的影响都较小,其  $F$  值分别为 0. 11 和 0. 37,都小于误差列,因此其规律受到其他因素的影响较明显,在正交试验中对其规律分析没有意义.从图 5 可以看出,脉宽和占空比对电极相对损耗小幅度波动,当脉宽为  $60\text{ }\mu\text{m}$  和占空比为 0. 45 时,电极相对损耗有最小值.

由表 6 可知,冲液压强对电极相对损耗的  $F$  值为 2. 48,对电极相对损耗的影响程度仅次于峰值电流,这与极差分析结果一致.从图 5 可知,随着冲液压强的增大,电极相对损耗先减小后增大.这是由于冲液压强较低时,排泄较差,因此增加了电极损耗量;当冲液压强增大,冲液效果得到改善,排泄效果提高,因此电极损耗量减少.当冲液压强继续增加,由电极稳定性变差导致冲液效果变差,使电极损耗量变大.

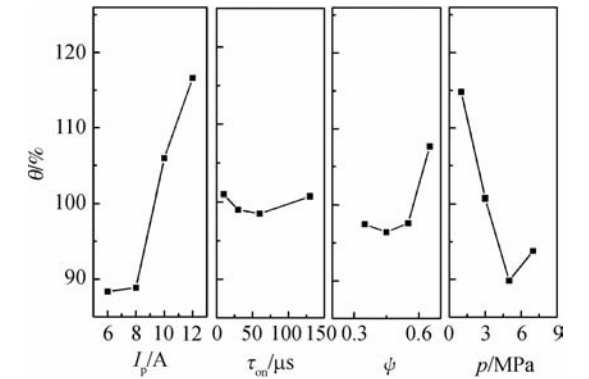


图 5 各因素对电极相对损耗的影响

Fig. 5 Effects of input parameters associated with electrode relative-wear

3. 3 参数优选

针对综合评分值,从表 7 可以看出,极差值从大到小所对应的影响因素依次是冲液压强、峰值电流、占空比、脉宽.由图 6 可得,当电流为 8 A、脉

宽为  $130\text{ }\mu\text{s}$  时对应的综合评分值最高;占空比越小综合评分值越高,综合评分最高点为占空比 0. 35.综合评分值随着冲液压强的增加先增大后减小,5 MPa 时冲液效果最好.所以峰值电流为 8 A、脉宽为  $130\text{ }\mu\text{s}$ 、占空比为 0. 35、冲液压强为 5 MPa 时为最佳的加工参数.对该参数进行加工试验研究,得出其电极相对损耗为 73. 4%,材料去除率为  $0. 448\text{ mm}^3/\text{min}$ ,将其带入式(5),得出其综合评分值为 84. 9 分,是目前综合评分最优的结果.

表 7 综合评分值极差分析

Table 7 Range analysis for synthetical score

| 均值 | 综合评分  |             |        |       |
|----|-------|-------------|--------|-------|
|    | $I_p$ | $\tau_{on}$ | $\psi$ | $p$   |
| 1  | 59. 5 | 47. 3       | 60. 0  | 34. 4 |
| 2  | 64. 6 | 56. 3       | 58. 3  | 52. 0 |
| 3  | 49. 1 | 58. 1       | 55. 3  | 70. 9 |
| 4  | 47. 3 | 58. 8       | 46. 9  | 63. 2 |
| 极差 | 17. 3 | 11. 5       | 13. 1  | 36. 6 |

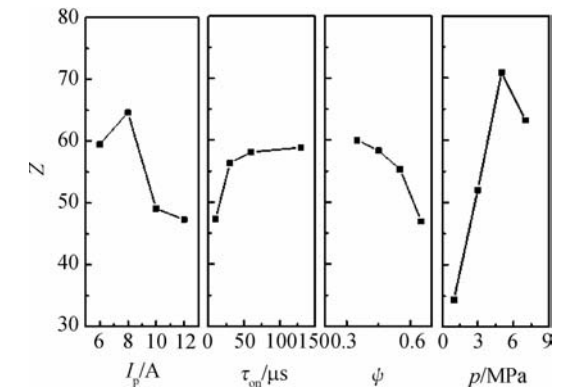


图 6 各个因素对综合评分的影响

Fig. 6 Effects of input parameters associated with synthetical score

图 7 为高温合金 IN718 上  $\phi 0. 5\text{ mm}$  小孔加工样件截面图.图 8 分别为用超景深显微镜拍摄的正交试验第 1 组参数(电流为 6 A、脉宽为  $10\text{ }\mu\text{s}$ 、占空比为 0. 35、冲液压强为 1 MPa)、第 16 组参数(电流为 12 A、脉宽为  $130\text{ }\mu\text{s}$ 、占空比为 0. 35、冲液压强为 5 MPa)和最优参数(峰值电流为 8 A、脉宽为  $130\text{ }\mu\text{s}$ 、占空比为 0. 35、冲液压强为 5 MPa)的三维形貌图.图 8(a)中,加工表面凹坑较小,这是由于峰值电流、脉宽和间隙电压越小单个脉冲能量就越小,间隙电压与电极材料及工作液种类有关,而第 1 组参数的峰值电流和脉宽都较

小,且较小能量的单个脉冲对材料的蚀除量也较小,因此导致加工表面凹坑较小;孔壁表面发现大量黄色铜颗粒和黑色碳化物,这是由于第 1 组参数冲液压强较小,排泄较差,导致融化的铜电极和

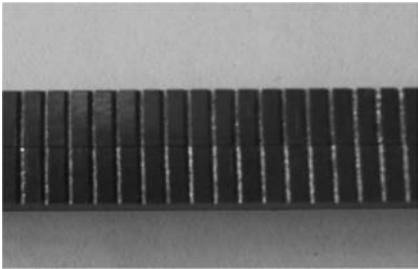
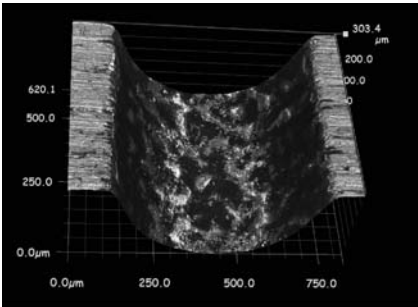
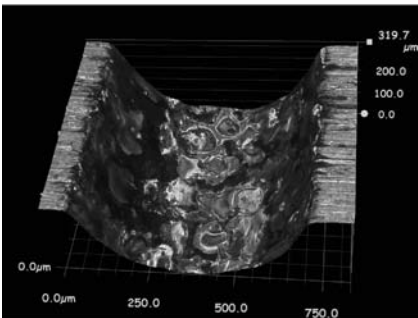


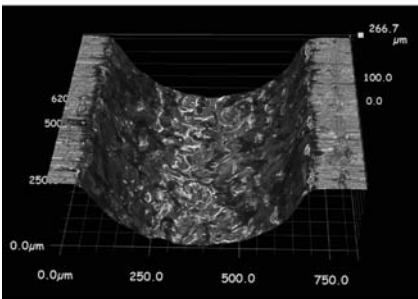
图 7 高温合金工件上小孔加工截面  
Fig. 7 Cross section of micro holes in superalloy workpiece



(a) 第1组参数



(b) 第16组参数



(c) 最优参数

图 8 加工表面三维形貌

Fig. 8 Three-dimensional shape of machined surface

产生的碳化物附着在工件表面,严重影响了第 1 组加工参数的材料去除率. 图 8(b)中可以看出加工表面没有明显的黄铜和碳化物的附着,这是由冲液压强较大,排泄效果较好,但加工表面凹坑比图 8(a)和图 8(c)明显,这是由于放电能量较大,单个脉冲对工件的蚀除量大导致. 图 8(c)中可以看出,最优参数加工表面没有明显的铜和碳化物的附着,且加工表面凹坑明显比第 16 组参数小.

4 结 论

本文以在煤油工作液中,通过旋转电极内冲液的加工形式,利用黄铜管状电极,对高温合金 IN718 上  $\phi 0.5\text{ mm}$  的小孔进行峰值电流、脉宽、占空比和冲液压强 4 因素 4 水平的正交试验研究,建立综合评分公式,选择最佳的加工参数. 通过试验结果分析得到如下结论:

1) 各因素对材料去除率的影响程度,由大到小依次为:峰值电流、脉宽、冲液压强、占空比. 材料去除率随峰值电流和脉宽的增大而变快,冲液压强为 5 MPa 时,材料去除率有最大值. 材料去除率最快的参数选择方案电流为 12 A、脉宽为 130  $\mu\text{s}$ 、占空比为 0.35、冲液压强为 5 MPa.

2) 各因素对电极相对损耗的影响程度,由大到小依次为:峰值电流、冲液压强、占空比、脉宽. 电极相对损耗率随着峰值电流的增大而增加,随着冲液压强、占空比和脉宽的增大先减小后增加. 电极相对损耗最低的因素选择方案电流为 8 A、脉宽为 60  $\mu\text{s}$ 、占空比为 0.45、冲液压强为 5 MPa.

3) 建立了综合评分公式,并根据各个参数综合评分均值,得到最佳的加工参数电流为 8 A、脉宽为 130  $\mu\text{s}$ 、占空比为 0.35、冲液压强为 5 MPa,对该参数进行试验验证,是目前综合评分最高参数组.

参考文献:

[1] 邹金文,汪武祥. 粉末高温研究进展与应用[J]. 航空材料学报,2006,26(3):244-250.  
ZOU Jinwen, WANG Wuxiang. Development and application of PM superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 244-250. (in Chinese)  
[2] 陈焕铭,胡本芙,张义文,等. 飞机涡轮盘用镍基粉末高温合金研究进展[J]. 材料导报,2002,16(11):17-19.  
CHEN Huanming, HU Benfu, ZHANG Yiwen, et al. Recent development in nickel-based powder superalloy used in aircraft turbines[J]. Materials Review, 2002, 16(11): 17-19. (in Chinese)  
[3] 谢浩,张靖周. 致密孔阵气膜冷却绝热温比和对流换热系

数的数值研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(6): 1229-1235.

XIE Hao, ZHANG Jingzhou. Aeroengine gas path fault diagnosis using rough sets and neural networks[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(6): 1229-1235. (in Chinese)

[ 4 ] 赵秀芬, 王玉华, 刘阳, 等. 镍基高温合金的切削加工[J]. 航空制造技术, 2010(11): 46-50.

ZHAO Xiufen, WANG Yuhua, LIU Yang, et al. Cutting of nickel-based high temperature alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(11): 46-50. (in Chinese)

[ 5 ] Somani M C, Muraleedharan K, Prasad Y, et al. Mechanical processing and microstructural control in hot working of hot is statically pressed P/M IN-100 superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 1998, 245(1): 88-99.

[ 6 ] Sarabjeet S S, Ajay B, Sanjeev K. EDM of metal matrix composite for parameter design using lexicographic goal programming[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28(4): 495-500.

[ 7 ] Tahsin T Ö, Bülent E, Abdulkadir E. An experimental study on the geometry of microholes in microelectric discharge machining[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2009, 24(12): 1236-1241.

[ 8 ] Rajyalakshmi G, Ramaiah P V. Multiple process parameter optimization of wire electrical discharge machining on Inconel 825 using Taguchi grey relational analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(5): 1249-1262.

[ 9 ] Kang S H, Kim D E. Fatigue crack susceptibility of electrical discharge drilled holes in nickel based heat resistant alloy[J]. Materials Science and Technology, 2006, 22(1): 21-28.

[10] 李丽, 魏修亭, 程祥, 等. IN718 镍基高温合金电火花加工表面完整性初步研究[J]. 功能材料, 2012, 43(24): 3479-3483.

LI Li, WEI Xiuting, CHENG Xiang, et al. Surface integrity of IN718 nickel alloy after electrical discharge machining [J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(24): 3479-3483. (in Chinese)

[11] 夏劲武. 高温合金 GH4169 电解加工和电火花加工表面质量研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

XIA Jinwu. Research on surface quality of superalloy GH4169 machined by ECM & EDM[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)

[12] Kuppan P, Rajadurai A, Narayanan S. Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 38(1): 74-84.

[13] Anil K, Sachin M, Chitra S, et al. Analysis of machining characteristics in additive mixed electric discharge machining of nickel-based super alloy Inconel 718[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2011, 26(8): 1011-1018.

[14] WANG Fei, LIU Yonghong, SHEN Yang, et al. Machining performance of Inconel 718 using high current density electrical discharge milling[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28(10): 1147-1152.

[15] Mustafa A, Ulaş Ç, Ahmet H. Optimization of micro-EDM drilling of Inconel 718 superalloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(5/6/7/8): 1015-1023.

[16] Aliakbari E, Baseri H. Optimization of machining parameters in rotary EDM process by using the Taguchi method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(9/10/11/12): 1041-1053.

[17] LI Lei, GU Lin, XI Xuecheng, et al. Influence of flushing on performance of EDM with bunched electrode[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(1): 187-194.

[18] Chattopadhyaya K D, Vermab S, Satsangic P S, et al. Development of empirical model for different process parameters during rotary electrical discharge machining of copper-steel (EN-8) system[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(3): 1454-1465.

(编辑: 秦理曼)