

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.004

# 往复运丝电火花线切割加工 FGH96 试验研究

冯业飞<sup>1</sup>, 梁静耀<sup>2</sup>, 李元锟<sup>2</sup>, 韩钊<sup>2</sup>, 王旭青<sup>1</sup>, 房晓龙<sup>2</sup>

(1. 中国航发北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095;

2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**开展粉末高温合金 FGH96 往复走丝电火花切割加工试验, 研究脉冲宽度、占空比、峰值电流等工艺参数对加工效率、表面粗糙度和重铸层厚度的影响, 优选出参数组合为脉宽 8  $\mu\text{s}$ 、占空比 10%、峰值电流 12 挡; 在此基础上, 利用工作液电导率的变化模拟工作液工作时长的影响。试验表明: 需在工作液电导率提高至 5.27 mS/m 左右时彻底更换工作液。进行枞树型榫槽结构加工试验, 分析加工精度与重铸层厚度情况, 榫槽齿顶重铸层厚度小于齿侧和齿根, 初步验证了往复走丝电火花线切割加工可以用于航空发动机涡轮盘榫槽粗加工。

**关键词:**电火花线切割; 粉末高温合金; 正交试验; 重铸层; 榫槽

**中图分类号:**V263 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)05-0021-06

## Experimental Research on Reciprocating Wire Electrical Discharge Machining FGH96

FENG Yefei<sup>1</sup>, LIANG Jingyao<sup>2</sup>, LI Yuankun<sup>2</sup>, HAN Zhao<sup>2</sup>, WANG Xuqing<sup>1</sup>, FANG Xiaolong<sup>2</sup>

(1. Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;  
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The experiment on the reciprocating wire electrical discharge machining (WEDM) of powder superalloy FGH96 was carried out to study the influence of process parameters such as pulse width, duty cycle and peak current over machining efficiency, surface roughness and recast layer thickness, and optimize a parameter combination of 8  $\mu\text{s}$  in pulse width, 10% in duty cycle and 12 in peak current level. On this basis, the change of working fluid conductivity was used to simulate the influence of working time of the working fluid. The experimental results show that the working fluid needs to be replaced when its conductivity is increased to about 5.27 mS/m. The machining experiments of fir-tree slot and the analysis on the machining accuracy and the recast layer thickness indicate that the recast layer thickness at the top tooth is less than that at tooth side and tooth root, which preliminarily verifies the applicability of reciprocating WEDM in rough machining of turbine slots.

**Keywords:** WEDM; powder superalloy; orthogonal test; recast layer; turbine slot

## 0 引言

涡轮盘是航空发动机三大核心热端部件之一, 通过榫槽与叶片榫头相连传递动力。粉末高温合金 FGH96 具有高强度、高热稳定性和耐腐蚀性, 被广泛应用于航空发动机涡轮盘, 是典型的难切削加工材料。粉末高温合金涡轮盘榫槽的高效精密加工是航空发动机制造领域的关注热点。电火花线切割加工是通过线状电极对工件火花放电进行切割加工的制造工艺, 具有加工与材料力学性能无关、加工柔性高等特点, 十分适合难切削材料直纹构件的加工。然而, 电火花线切割加工的

表面存在重铸层和残余拉应力, 影响零件的疲劳寿命。

近年来, 在高温合金材料电火花线切割加工方面, 国内外学者开展了广泛研究, 主要关注重铸层厚度和均匀性等表面质量指标。SHARMA 等<sup>[1]</sup>采用慢走丝电火花线切割加工 10 mm 厚的 Inconel 706 高温合金榫槽工件, 通过大电流高电压粗加工+小电流低电压两次精修的工艺模式, 可以显著改善慢走丝电火花线切割加工表面质量。KLOCKE 等<sup>[2]</sup>试验比较了镀镍涂层电极丝和黄铜电极丝慢走丝电火花线切割加工 Inconel 718 高温合金枞树形工件的工艺效果, 发现镀镍涂层电极

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51975291); 航空发动机及燃气轮机基础科学中心基金项目(P2022-B-IV-010-001); 中央高校基本科研业务费资助项目(NE2022004)

**第一作者简介:**冯业飞(1985—), 男, 河南濮阳人, 高级工程师, 博士, 研究方向为粉末高温合金, yefei@126.com。

丝相比黄铜电极丝可以提高加工效率 33%,但黄铜电极丝的加工表面质量更佳。根据试验结果认为慢走丝电火花线切割加工镍基高温合金榫槽的加工效率比拉削加工低约 90%。LI 等<sup>[3]</sup>研究了放电能量对 Inconel 718 高温合金慢走丝电火花线切割加工表面质量的影响,发现高放电能量下表面形貌呈现珊瑚礁状微结构,而低放电能量下表面形貌以随机微孔洞为主。蒲一民<sup>[4]</sup>采用慢走丝电火花线切割加工 TC4 合金 Johnson-Cook 材料涡轮盘榫槽,并对工艺参数进行了优化,实现了涡轮盘上全部 43 个榫槽结构的加工。于建华等<sup>[5]</sup>研究慢走丝电火花线切割加工 FGH96 材料,采用分层线切割加工方法来控制加工残余应力及涡轮盘榫槽变形,控制榫槽平面轮廓度误差在 10  $\mu\text{m}$  以内,圆弧轮廓度误差在 17  $\mu\text{m}$  以内。

综上所述,现有研究多采用慢走丝电火花线切割粗成型、多次精修的工艺路线加工涡轮盘榫槽。往复走丝电火花线切割加工(快走丝)虽然加工精度较低,但机床投入和加工成本低,在粗加工阶段大有用武之地。本文通过正交试验研究往复走丝电火花线切割加工粉末高温合金 FGH96 的工艺规律;综合考虑加工速度和表面质量,优选出加工参数组合;最后进行枞树型涡轮盘榫槽的加工可行性验证,为航空发动机涡轮盘榫槽结构高效、低成本加工提供参考。

## 1 试验安排

### 1.1 试验装置

试验所用加工机床是苏州某公司 DK7732P 型往复走丝电火花线切割机床。工件材质为粉末高温合金 FGH96,厚度 40 mm。使用接触式粗糙度轮廓仪(Talysurf i-Series 5)对工件表面粗糙度进行测量,使用超景深显微镜(VHX-6000)对工件表面三维形貌以及重铸层进行观察测量。

### 1.2 正交试验设计

试验选择脉冲宽度、占空比和峰值电流作为考察因素,因子水平如表 1 所示,并采用  $L_{16}(4^3)$  的正交试验表。

表 1 因子水平表

| 因子水平 | A 脉宽时间/ $\mu\text{s}$ | B 占空比/% | C 峰值电流<br>挡位/挡 |
|------|-----------------------|---------|----------------|
| 1    | 8                     | 70      | 3              |
| 2    | 16                    | 50      | 6              |
| 3    | 32                    | 30      | 9              |
| 4    | 64                    | 10      | 12             |

## 2 正交试验结果分析

本次试验结果如表 2 所示。

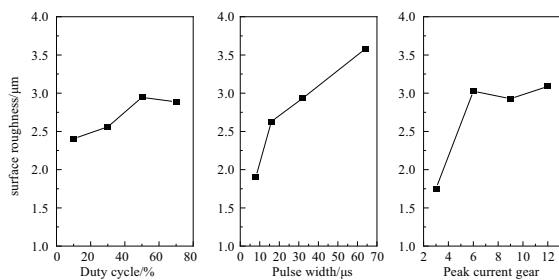
表 2 正交试验结果

| 编号 | 脉宽<br>时间/ $\mu\text{s}$ | 占空比/% | 峰值电流<br>挡位/挡 | 表面粗糙度/ $\mu\text{m}$ | 重铸层平均<br>厚度/ $\mu\text{m}$ | 重铸层最大<br>厚度/ $\mu\text{m}$ | 加工速度/<br>( $\text{mm}^2/\text{min}$ ) |
|----|-------------------------|-------|--------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| 1  | 8                       | 70    | 3            | 1.29                 | 0                          | 0                          | 5.76                                  |
| 2  | 8                       | 50    | 6            | 2.32                 | 11.27                      | 20.42                      | 24.24                                 |
| 3  | 8                       | 30    | 9            | 1.98                 | 7.58                       | 19.39                      | 50.20                                 |
| 4  | 8                       | 10    | 12           | 2.02                 | 9.21                       | 15.81                      | 52.40                                 |
| 5  | 16                      | 70    | 6            | 3.02                 | 3.14                       | 15.92                      | 40.26                                 |
| 6  | 16                      | 50    | 3            | 2.06                 | 0                          | 0                          | 4.00                                  |
| 7  | 16                      | 30    | 12           | 2.71                 | 11.79                      | 22.73                      | 75.47                                 |
| 8  | 16                      | 10    | 9            | 2.71                 | 11.20                      | 19.73                      | 54.79                                 |
| 9  | 32                      | 70    | 9            | 3.25                 | 14.43                      | 36.47                      | 80.00                                 |
| 10 | 32                      | 50    | 12           | 3.65                 | 14.25                      | 33.12                      | 82.75                                 |
| 11 | 32                      | 30    | 3            | 1.81                 | 2.34                       | 3.46                       | 5.00                                  |
| 12 | 32                      | 10    | 6            | 3.03                 | 10.83                      | 20.42                      | 35.08                                 |
| 13 | 64                      | 70    | 12           | 3.97                 | 18.17                      | 35.77                      | 99.17                                 |
| 14 | 64                      | 50    | 9            | 3.75                 | 16.73                      | 26.31                      | 76.92                                 |
| 15 | 64                      | 30    | 6            | 3.72                 | 13.36                      | 22.52                      | 41.23                                 |
| 16 | 64                      | 10    | 3            | 1.84                 | 2.87                       | 6.81                       | 2.94                                  |

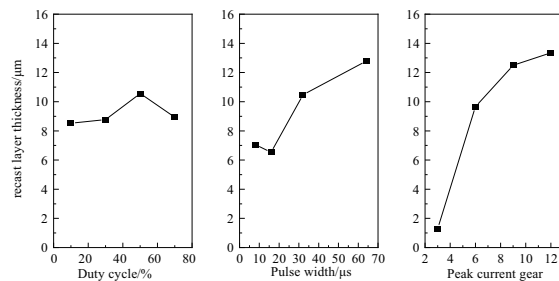
对加工速度、表面粗糙度和重铸层厚度进行极差分析,因脉宽、占空比和峰值电流均有各自不同的 4 组结果,所以对应不同指标的 4 个均值,再计算极差,结果如表 3 和图 1 所示。

表 3 主次因素分析

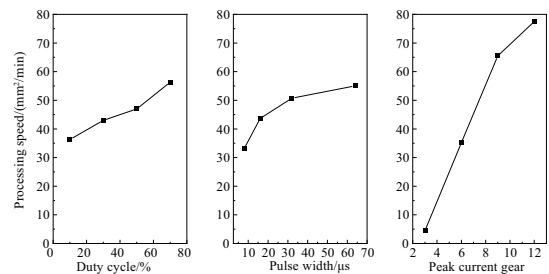
| 指标                              | 极差   | 因素     |       |        |
|---------------------------------|------|--------|-------|--------|
|                                 |      | A 脉宽时间 | B 占空比 | C 峰值电流 |
| 加工速度/<br>(mm <sup>2</sup> /min) | 均值 1 | 33.16  | 56.30 | 4.43   |
|                                 | 均值 2 | 43.63  | 46.98 | 35.21  |
|                                 | 均值 3 | 50.71  | 42.98 | 65.48  |
|                                 | 均值 4 | 55.21  | 36.31 | 77.45  |
|                                 | 极差值  | 22.05  | 19.99 | 73.02  |
| 因素主次                            |      | 2      | 3     | 1      |
| 表面粗糙度/<br>μm                    | 均值 1 | 1.91   | 2.89  | 1.75   |
|                                 | 均值 2 | 2.63   | 2.95  | 3.03   |
|                                 | 均值 3 | 2.94   | 2.56  | 2.93   |
|                                 | 均值 4 | 3.33   | 2.41  | 3.09   |
|                                 | 极差值  | 1.42   | 0.54  | 1.34   |
| 因素主次                            |      | 1      | 3     | 2      |
| 重铸层平均厚度/<br>μm                  | 均值 1 | 7.02   | 8.94  | 1.31   |
|                                 | 均值 2 | 6.54   | 10.57 | 9.66   |
|                                 | 均值 3 | 10.47  | 8.77  | 12.49  |
|                                 | 均值 4 | 12.79  | 8.53  | 13.36  |
|                                 | 极差值  | 6.25   | 2.04  | 12.05  |
| 因素主次                            |      | 2      | 3     | 1      |



(a) 表面粗糙度与占空比、脉宽和峰值电流的关系



(b) 重铸层厚度与占空比、脉宽和峰值电流的关系



(c) 加工速度与占空比、脉宽和峰值电流的关系

图 1 表面粗糙度、重铸层厚度和加工速度与各个因素的关系

根据极差分析原理可知,极差大小说明对试验结果影响的主次,极差最大的因素说明该因素的水平对试验指标的影响最大。由表 3 可知,影响工件表面粗糙度的因素主次分别是脉宽 A、峰值电流 C 和占空比 B,如图 1(a)所示。在该试验中因素水平的最小值为该因素的最优水平,根据表 3 中各因素水平的均值,可得到各因素优化水平为 A<sub>1</sub>C<sub>1</sub>B<sub>4</sub>(脉宽 8 μs、峰值电流 3 挡、占空比 10%);同理重铸层厚度的因素优化水平为 C<sub>1</sub>A<sub>2</sub>B<sub>4</sub>(峰值电流 3 挡、脉宽 16 μs、占空比 10%),重铸层厚度与脉宽 A、峰值电流 C 和占空比 B 的关系如图 1(b)所示。相反,加工速度在该试验中因素的水平最大值为该因素的最优水平 C<sub>4</sub>A<sub>4</sub>B<sub>1</sub>(峰值电流 12 挡、脉宽 64 μs、占空比 70%),加工速度与脉宽 A、峰值电流 C 和占空比 B 的关系如图 1(c)所示。

3 个指标下的优化参数组合不一致,而在实际生产过程中需要兼顾各工艺指标达到综合较优的水平,因此对各工艺参数进行综合考虑。出于对加工效率的考虑,脉冲放电能量不能太小(图 1(c)),而脉冲放电能量过大又对表面粗糙度不利(图 1(a)),因此脉冲放电能量应为适中的大小<sup>[6-7]</sup>。另一方面,当脉冲能量相同,减小脉宽可使放电通道变小、放电通道内电流密度增大,由于材料单位面积受到的热量变大,材料更多以气化的形式蚀除<sup>[8-9]</sup>,减小了重铸层厚度(图 1(b))。选择小脉宽和大峰值电流的电参数组合可实现加工速度、表面粗糙度和重铸层厚度的兼顾,因此选择脉宽为 8 μs、峰值电流为 12 挡。在 16 组试验中第 4 组(脉宽 8 μs、占空比 10%和峰值电流 12 挡)为符合该条件的参数,该组试验的各工艺指标均处于 16 组试验中的前 50%,因此该参数较为合理。

优选参数加工结果为:加工速度 52.40 mm<sup>2</sup>/min,表面粗糙度 2.02 μm,重铸层平均厚度 9.21 μm,重铸层最大厚度 15.81 μm。最优参数加工表面形貌

如图 2(a)所示,重铸层如图 2(b)所示。

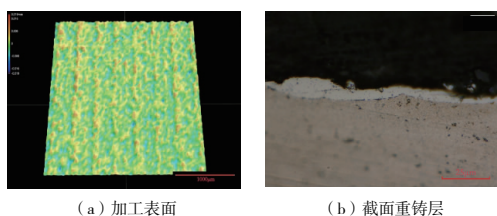


图 2 优选参数加工结果

### 3 基于表面质量的占空比单因素优化

表面波纹度和表面粗糙度是衡量加工表面质量的两个重要指标。优选参数中,占空比为 10% 较小,可能导致欠跟踪现象而影响加工效率。同时,占空比的变化可能会对加工表面质量产生较大的影响。因此,继续开展了占空比单因素试验作进一步优化。试验设置占空比依次从 10% 增大到 70% 开展单因素试验,考察加工表面质量和加工效率的变化。

如图 3 所示,随着占空比逐渐减小,表面波纹度从  $15.67 \mu\text{m}$  降低到  $7.17 \mu\text{m}$ ,降低了 54.2%,且由图 4 所示,对比占空比 60% 的加工表面(图 4(b)),占空比 10% 表面(图 4(a))的条纹起伏显著降低。可见占空比的减小极大地改善了加工间隙内的排屑条件,减轻了加工表面的烧伤条纹,有效降低了加工表面的波纹起伏。本组参数中占空比 10% ~ 30% 时表面波纹度  $W_c$  值处于较低水平。

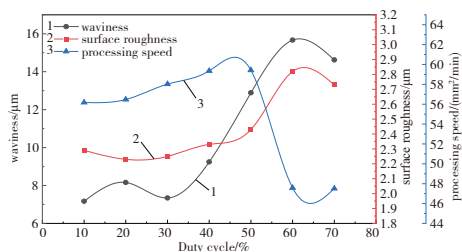


图 3 不同占空比工件表面波纹度  $W_c$ 、表面粗糙度和加工速度

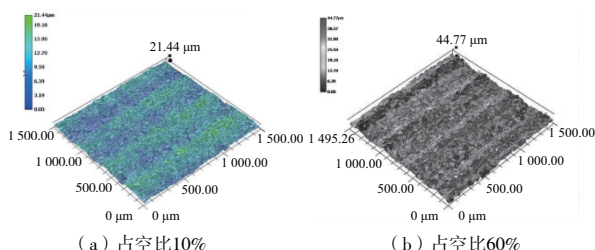


图 4 工件表面波纹度对比

由图 3 可知,当占空比为 60% 和 70% 时表面粗糙度最大,达到  $2.82 \mu\text{m}$  以上;当占空比小于

50% 后表面粗糙度  $Ra$  大幅降低到  $2.3 \mu\text{m}$  左右。这是因为占空比过大时恶劣的排屑条件对表面质量产生了较大影响,但各组工件表面粗糙度  $Ra$  均在  $2.3 \sim 2.8 \mu\text{m}$  水平。由于表面粗糙度主要受到单个脉冲能量的影响,占空比对表面粗糙度影响较小,因此占空比的选择满足排屑要求即可,占空比 10% ~ 40% 时表面粗糙度  $Ra$  值处于较低水平。当占空比在 60% ~ 70% 时,加工速度在  $50 \text{ mm}^2/\text{min}$  以下,此时因为占空比太大,极间很难在较短的脉冲间隔时间内完成消电离,伺服进给系统不得不以降低进给速度的方式满足极间消电离要求,降低了加工能力。在占空比 50% 以下时,加工速度大幅提高到了  $59.42 \text{ mm}^2/\text{min}$ ,达到了正常加工条件,之后随着占空比降低,加工速度逐渐降低。

综上所述,将占空比从 10% 提升至 30%,即新优选参数为脉宽  $8 \mu\text{s}$ 、占空比 30%、峰值电流 12 挡。相比于原优选参数,该组参数加工速度增大了约  $2 \text{ mm}^2/\text{min}$ ,但表面粗糙度和表面波纹度值几乎不变。

### 4 工作液电导率对加工质量的影响

往复走丝线切割机床工作液长时间使用,绝缘性和洗涤能力会下降。为了避免实际加工中工作液失效而导致加工工艺指标与目标偏离过大,进行了工作液使用程度单因素试验,以评估工作液使用情况与加工结果的关系。试验开展前,将工作液箱中的旧工作液(使用时长约 400h)导出备用。新工作液选用 JR1AA 型工作液与水按照 1:15 的比例进行配置,与旧工作液按照表 4 进行配比,工作液编号从 1—4 分别模拟工作液使用程度逐渐增加的过程,4 组工作液的外观如图 5 所示。

表 4 试验用工作液配比

| 编号 | 新工作液占比/% | 新工作液体积/L | 旧工作液体积/L | 电导率/(mS/m) |
|----|----------|----------|----------|------------|
| 1  | 100      | 20       | 0        | 4.11       |
| 2  | 75       | 15       | 5        | 5.27       |
| 3  | 50       | 10       | 10       | 6.35       |
| 4  | 25       | 5        | 15       | 7.28       |

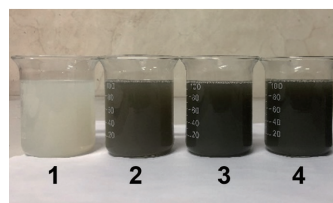


图 5 不同使用程度工作液

本次试验中选择小脉冲宽度电参数,试验参数:脉宽  $8\ \mu\text{s}$ , 占空比 50%, 峰值电流 12 挡, 得到加工速度和表面粗糙度与电导率的关系如图 6 所示。

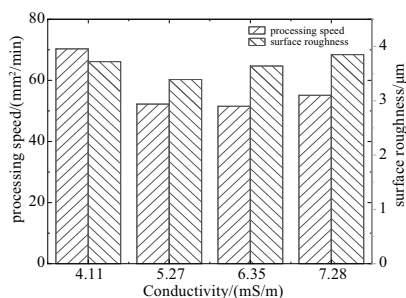


图6 加工速度和表面粗糙度与电导率关系

由图6可以看出,加工速度随着电导率的变大逐渐减小。这是因为随着工作液中悬浮物增多,绝缘性能和洗涤性能的降低使加工间隙内的电蚀产物排出不畅,降低了加工间隙内脉冲放电的蚀除能力,因此加工速度出现了显著下降。

表面粗糙度值随电导率变大呈先降低后升高的趋势。这是因为全新的工作液绝缘性能好,放电间隙更难被击穿,增大了单个脉冲在工件表面的材料蚀除量,加工工件的表面粗糙度较好。经过短时间加工后(75%新工作液),工作液中悬浮着一定数量的电蚀产物,使放电通道更容易被击穿,加工效果较好。随着工作液的继续使用,工作液中的杂质过多,工作液绝缘性能降低,使加工间隙内消电离变差,容易导致发生二次放电,降低加工稳定性,使加工表面质量变差。

试验证明,随着工作液的使用,加工速度和表面质量呈现下降趋势,选择以电导率为工作液失效指标,应在工作液电导率提高至  $5.27\ \text{mS/m}$  左右时判断工作液已达到使用寿命<sup>[10-11]</sup>,对其进行彻底更换。

## 5 枞树型榫槽加工验证

针对某型发动机枞树形榫槽形状,进行往复走丝电火花线切割加工榫槽结构的工艺效果验证,如图7所示。槽高  $30\ \text{mm}$ , 使用优选参数(脉宽  $8\ \mu\text{s}$ 、占空比 30%、峰值电流 12 挡)加工出图7(a)所示半槽结构。

使用影像测量仪(OGP Smart Scope ZIP 250)对如图7(b)所示榫槽在高度方向的轮廓进行测量,结果如图8所示。截面1直线度为  $15\ \mu\text{m}$ , 截面2直线度为  $18.96\ \mu\text{m}$ , 榫槽在高度方向上直线

度误差小于  $20\ \mu\text{m}$ 。表面轮廓呈现S形可能是加工中电极丝在加工间隙的上部和下部受到的冲液压力和放电力不一致后发生挠曲变形造成的。

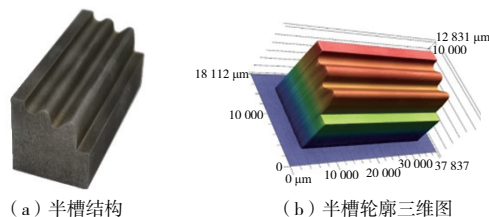


图7 榫槽轮廓测量位置示意图

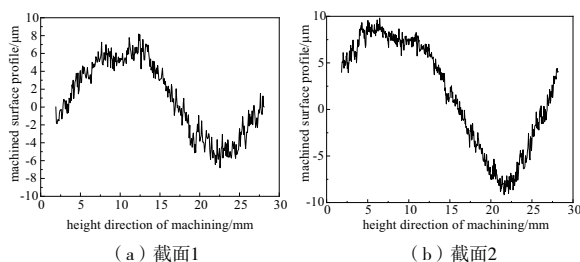


图8 榫槽结构高度方向直线度

对高度方向上的重铸层厚度进行测量,结果如图9所示,榫槽中部(10 mm 高度处)的重铸层厚度较顶部和底部重铸层厚度更大,与基础试验数据基本吻合。

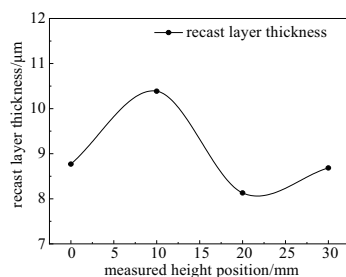


图9 榫槽不同高度重铸层厚度

## 6 结语

本文针对 FGH96 材料进行了往复走丝电火花线切割加工试验研究。

1)通过正交试验,研究了脉冲宽度、占空比和峰值电流对重铸层厚度、表面粗糙度和加工速度的影响规律,优选出参数组合:脉冲宽度  $8\ \mu\text{s}$ , 占空比 10%, 峰值电流 12 挡, 加工速度  $52.40\ \text{mm}^2/\text{min}$ 、表面粗糙度  $2.02\ \mu\text{m}$ 、重铸层平均厚度  $9.21\ \mu\text{m}$ 、重铸层最大厚度  $15.81\ \mu\text{m}$ 。在此基础上,开展占空比单因素实验,优选出占空比 30%, 在加工速度提高约  $2\ \text{mm}^2/\text{min}$  的基础上,保持加工质量几乎不变。

2)开展了工作液电导率对加工质量的影响试验。试验结果表明需在工作液电导率提高至  $5.27$

mS/m 左右时彻底更换工作液。

3)进行了榫槽加工的可行性验证,榫槽中部(10 mm 高度处)的重铸层厚度较顶部和底部重铸层厚度更大,与基础试验数据基本吻合。

### 参考文献:

- [1] SHARMA P, CHAKRADHAR D, NARENDRANATH S. Precision manufacturing of turbine wheel slots by trim-offset approach of WEDM[J]. Precision Engineering, 2021, 71:293-303.
- [2] KLOCKE F, WELLING D, KLINK A, et al. Evaluation of advanced wire-EDM capabilities for the manufacture of fir tree slots in inconel 718[J]. Procedia CIRP, 2014, 14:430-435.
- [3] LI L, GUO Y B, WEI X T, et al. Surface integrity characteristics in wire-EDM of inconel 718 at different discharge energy[J]. Procedia CIRP, 2013, 6:220-225.
- [4] 蒲一民. 涡轮盘榫槽线切割加工工艺研究[J]. 航天制造技术, 2016(2):37-40, 70.
- [5] 于建华, 李勋, 丁志纯. 涡轮盘榫槽加工工艺及变形控制方法研究[J]. 制造技术与机床, 2022(11): 144-149.
- [6] GOHIL V, PURI Y M. Optimization of electrical discharge turning process using taguchi-grey relational approach[J]. Procedia CIRP, 2018, 68:70-75.
- [7] 马长进. ZrB<sub>2</sub>-SiC 陶瓷电火花单脉冲放电蚀除凹坑仿真与加工试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [8] 唐佳静. 基于热-流耦合分析的电火花加工材料蚀除及表面质量研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [9] WANG J, HAN F Z. Simulation model of debris and bubble movement in consecutive-pulse discharge of electrical discharge machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 77:56-65.
- [10] 严东剑, 刘志东, 潘红伟, 等. 基于空载率检测的聚晶金刚石复合片电火花线切割加工研究[J]. 电加工与模具, 2023(2):23-27.
- [11] 刘志东. 高速走丝电火花线切割工作介质性能要求研究[J]. 航空精密制造技术, 2006, 42(6):29-32.

收稿日期:2023-11-14

(上接第 20 页)

- [3] CHEN T F, CHENG S, JIN L Z, et al. Fabrication process and mechanical properties of C/SiC corrugated core sandwich panel[J]. Ceramics International, 2021, 47(3):3634-3642.
- [4] LIN K J, HU K M, GU D D. Metallic integrated thermal protection structures inspired by the Norway spruce stem: design, numerical simulation and selective laser melting fabrication[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 115:9-19.
- [5] QUEHEILLALT D T, CARBAJAL G, PETERSON G P, et al. A multifunctional heat pipe sandwich panel structure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(1/2):312-326.
- [6] DHARMASENA K P, WADLEY H N G, XUE Z Y, et al. Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(9):1063-1074.
- [7] CARBAJAL G, SOBHAN C B, PETERSON G P, et al. A quasi-3D analysis of the thermal performance of a flat heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(21/22):4286-4296.
- [8] CARBAJAL G, SOBHAN C B, PETERSON G P, et al. Thermal response of a flat heat pipe sandwich structure to a localized heat flux[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(21/22):4070-4081.
- [9] SOMASUNDARAM D, MANI A, KAMARAJ M. Experimental investigation of thermal performance of metal foam wicked flat heat pipe[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 82:482-492.
- [10] KASEN S D, QUEHEILLALT D T, STEEVES C A, et al. A heat plate leading edge for hypersonic vehicles[C]//Volume 1: Advances in Aerospace Technology. Boston, Massachusetts, USA: ASME/EDC, 2008:175-181.
- [11] UAN Y, HONG Y, LI Q. Investigation on transient behaviors of flat plate heat pipes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2004, 28(2):249-255.
- [12] 张平, 宣益民, 李强. 界面接触热阻的研究进展[J]. 化工学报, 2012, 63(2):335-349.
- [13] 纪献兵, 徐进良, ABANDA A M, 等. 超轻多孔泡沫金属平板热管的传热性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(2):72-78, 14.
- [14] 曹杰. 平板热管制造及其传热性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2019.
- [15] 孙健. 高超声速飞行器前缘疏导式热防护结构的工作机理研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [16] 刘洪鹏. 高速飞行器翼面气动热疏导的层板式热管机理研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- [17] 彭毅. 基于植物叶片结构的仿生均热板研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [18] 罗远强. 耐热型网状脉植物叶片多尺度热流结构与仿生均热板设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.

收稿日期:2023-10-31