

# LD 钢电火花线切割加工 工艺规律试验研究\*

江 开 勇

(华侨大学精密机械工程系, 泉州 362011)

**摘要** 研究 LD 钢电火花线切割加工的基本工艺规律, 及其工艺参数与工艺指标之间的关系, 得出生产率指标和表面粗糙度指标的预报模型, 为优选 LD 钢的电火花线切割加工参数提供依据。

**关键词** LD 钢, 电火花线切割, 工艺, 预报

**分类号** TG 484

新型模具钢——7Cr7Mo3V2Si(代号 LD), 具有强度高、韧性好、耐磨损等特点, 因而成为制作高强韧性、高寿命模具的优选材料。据报道, 采用 LD 钢制造冷镦、冷挤和冷冲模具, 其使用寿命比常用的工模具钢提高几倍至几十倍, 经济效益明显提高<sup>[1]</sup>。然而, 用户对它的加工工艺性不甚了解, 往往不敢贸然选用而影响其推广。电火花线切割加工, 是模具制造的主要加工方法之一。但是, 有关 LD 钢的电火花线切割加工的工艺规律至今尚未见报道。为此, 本文将通过试验的方法, 探索 LD 钢的电火花线切割加工的工艺规律。它为优选 LD 钢的电火花线切割加工工艺参数提供了依据, 因而避免选择工艺参数时的盲目性。试验研究结果表明: LD 钢的电火花线切割加工生产率指标与脉冲宽度无关, 仅与峰值电流与占空比有关; 表面粗糙度指标与占空比关系不大, 主要取决于峰值电流和脉冲宽度。

## 1 试验条件

试验与测试的设备有 J0780-1 型微机控制电火花线切割机床; CS-1575 型 5 MHz 示波器; SM-3 型表面粗糙度测定仪。试件为  $\varnothing 18$  mm 的 7Cr7Mo3V2Si(LD), 经 1100 °C 淬火, 在 550 °C 下三次回火, 每次回火 1 h, 表面硬度为 HRC 61。工作液的体积分数为 0.1 左右的皂化液, 钼丝直径为  $\varnothing 0.14$  mm。

## 2 单因素试验结果分析

在电火花线切割加工中, 可供选择的加工参数一般为峰值电流  $i_p$  (A), 脉冲宽度  $t_i$  ( $\mu$ s), 脉

\* 本文 1994-04-20 收到; 福建省自然科学基金资助项目

冲间隔  $t_0(\mu s)$ . 空载电压  $U_0(V)$  一般固定在 50 V 左右, 本试验取空载电压为 55 V(下同).

电火花线切割加工的主要工艺指标有生产率  $V_w(mm^3 \cdot min^{-1})$ , 表面粗糙度  $R_a(\mu m)$ . 为了初步而直观地了解 LD 钢的电火花线切割加工的工艺规律, 首先进行单因素试验, 三个单因素为峰值电流  $i_e$ , 脉冲宽度  $t_i$ , 占空比  $\lambda(\lambda=t_i/(t_i+t_0))$ , 其中峰值电流和脉冲宽度分别取 4 个水平, 占空比取 3 个水平(表 1). 值得一提的是, 这里并不把脉冲间隔  $t_0$  作为试验因素, 而是取占空比  $\lambda$  作为试验因素, 这种处理更符合电火花线切割加工的实际情况. 试验结果如图 1~4 所示.

表 1 单因素试验水平值

水平	$i_e/A$	$t_i/\mu s$	$\lambda$
1	9.0	27	0.2
2	12.6	32	0.3
3	16.2	42	0.4
4	23.4	57	

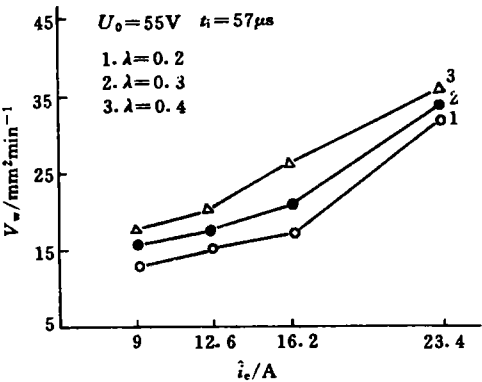


图 1 生产率与峰值电流的关系

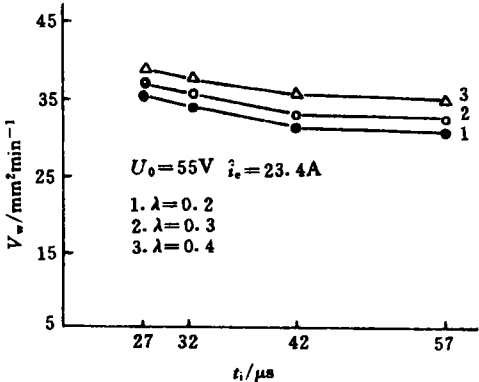


图 2 生产率与脉冲宽度的关系

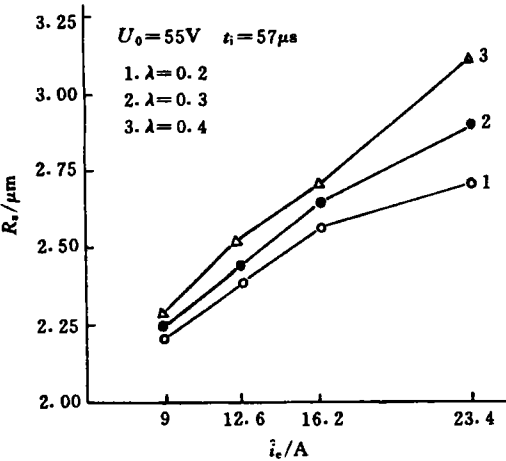


图 3 表面粗糙度与峰值电流的关系

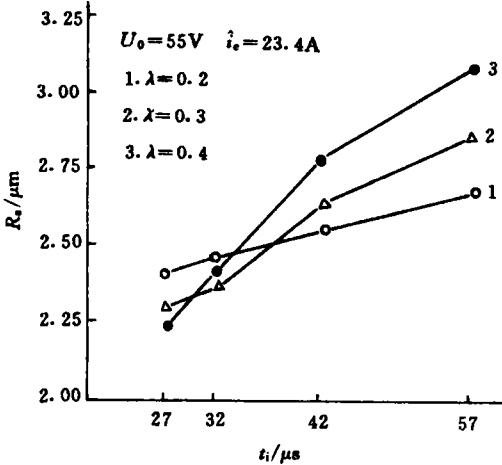


图 4 表面粗糙度与脉冲宽度的关系

从图 1~4 的试验结果可以看到, 生产率和表面粗糙度均随着峰值电流的增大而增大. 这说明如用增大峰值电流以提高生产率指标的同时, 将牺牲表面粗糙度指标. 因此, 在选择峰值电流时, 应根据加工需要来兼顾生产率指标和表面粗糙度指标. 当脉冲宽度增大时, 生产率略有下降, 表面粗糙度却明显增大. 由此可知, 在本试验所选择的脉冲宽度范围(本机床的极

限范围)内,应尽量选择小脉冲宽度加工。占空比的选择,根据电火花加工的基本原理,脉冲间隔时间主要用于使电极间消电离,保证稳定加工。只要能保证稳定加工,占空比一般取上限值,以提高生产率。从图 4 还可以看到,脉冲宽度与占空比的交互作用对表面粗糙度指标有影响。在以下的正交回归设计时,将考察这种交互作用的显著性。

3 工艺指标预报模型的正交回归设计

电火花加工的生产率指标与表面粗糙度指标,一般可用以下的经验公式表示<sup>[2]</sup>。即

$$V_w = K_w \hat{i}_c^{\alpha_1} \cdot t_i^{\alpha_2} \cdot \lambda^{\alpha_3}, \tag{1}$$

$$R_a = K_s \hat{i}_c^{\beta_1} \cdot t_i^{\beta_2} \cdot \lambda^{\beta_3}, \tag{2}$$

式中  $V_w$  为生产率( $\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ );  $R_a$  为表面粗糙度( $\mu\text{m}$ );  $K_w, K_s$  分别为待定的加工生产率常数和表面粗糙度常数,它与电极对材料、加工极性等有关。这里电极材料为钨丝,工件材料为 LD 钢,正极性加工;  $\hat{i}_c$  为峰值电流(A);  $t_i$  为脉冲宽度( $\mu\text{s}$ );  $\lambda$  为占空比;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ , 都是待定系数。

以下采用多元线性回归法求工艺指标的预报模型。为了能够通过较少的实验量得到更多的信息,这里采用  $L_8(2^7)$  正交试验,同时在零点进行 4 次重复试验,以提高显著性检验的灵敏度。为了保证试验数据的可靠性,每次试验又做一次重复试验。所以本组试验共进行 24 次试验。各试验因素的水平值如表 2,其因素的变换和编码如表 3 所示。

表 2 因素水平值

水平	$\hat{i}_c/\text{A}$	$t_i/\mu\text{s}$	$\lambda$
1	23.4	57	0.4
-1	9.0	27	0.2
0	16.2	42	0.3

表 3 因素变换及编码

$Z_j$	$\hat{i}_c/\text{A}$	$Z_1 = \ln \hat{i}_c$	$x_1$	$t_i/\mu\text{s}$	$Z_2 = \ln t_i$	$x_2$	$\lambda$	$Z_3 = \ln \lambda$	$x_3$
$Z_{2j}$	23.4	3.153	1	57	4.043	1	0.4	-0.916	1
$Z_{1j}$	9.0	2.197	-1	27	3.296	-1	0.2	-1.609	-1
$Z_{0j}$	16.2	2.675	0	42	3.670	0	0.3	-1.263	0
$\Delta_j$	$\Delta \hat{i}_c = 7.2$			$\Delta t_i = 15$			$\Delta \lambda = 0.1$		
$x_j = \frac{2(Z_j - Z_{2j})}{Z_{2j} - Z_{1j}} + 1$		$x_1 = 2.092Z_1 - 5.596$		$x_2 = 2.677Z_2 - 9.825$			$x_3 = 2.886Z_3 + 3.644$		

在安排试验方案时,考虑到图 4 中出现了脉冲宽度与占空比的交互作用对表面粗糙度指标的影响,安排了一个一级交互作用。试验结果见表 4。

表 4 试验结果

试验号	因 素 编 码					试 验 结 果			
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_2x_3$	$V_w/\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$	$y_{01} = \ln V_w$	$R_a/\mu\text{m}$	$y_{02} = \ln R_a$
1	1	1	1	1	1	34.859	3.551	3.090	1.128
2	1	1	1	-1	-1	31.742	3.458	2.688	0.989
3	1	1	-1	1	-1	38.170	3.642	2.226	0.800
4	1	1	-1	-1	1	35.841	3.579	2.404	0.877
5	1	-1	1	1	1	17.610	2.868	2.252	0.812

续表 4

试验号	因素编码					试验结果			
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_2x_3$	$V_w/\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$	$y_{i1}=\ln V_w$	$R_s/\mu\text{m}$	$y_{i2}=\ln R_s$
6	1	-1	1	-1	-1	12.639	2.537	2.212	0.794
7	1	-1	-1	1	-1	18.242	2.904	1.578	0.456
8	1	-1	-1	-1	1	10.798	2.379	1.706	0.534
9	1	0	0	0	0	27.560	3.316	2.512	0.921
10	1	0	0	0	0	26.507	3.277	2.664	0.980
11	1	0	0	0	0	24.606	3.203	2.338	0.849
12	1	0	0	0	0	26.897	3.292	2.262	0.816

对表 4 的试验结果进行回归分析,经显著性检验得知,因素  $x_1, x_3$  对加工速度指标的影响均在  $\alpha=0.01$  上显著;因素  $x_2, x_2x_3$  对加工速度指标的影响均在  $\alpha>0.25$  上显著. 因素  $x_1, x_2$  对表面粗糙度指标的影响均在  $\alpha=0.01$  上显著;  $x_3$  对表面粗糙度指标的影响在  $\alpha>0.25$  上显著;而  $x_2x_3$  对表面粗糙度指标的影响在  $\alpha=0.25$  上显著. 剔除  $\alpha>0.25$  的因素,可得到如下的回归模型. 即

$$\begin{aligned} y_{i1} &= 3.167 + 0.443x_1 + 0.127x_3 \\ &= 3.167 + 0.443(2.092Z_1 - 5.596) + 0.127(2.886Z_3 + 3.644) \\ &= 1.151 + 0.927Z_1 + 0.367Z_3, \\ V_w &= 3.161\hat{t}_e^{0.927} \cdot \lambda^{0.367}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} y_{i2} &= 0.830 + 0.150x_1 + 0.132x_2 + 0.039x_2x_3 \\ &= 0.830 + 0.150(2.092Z_1 - 5.596) + 0.132(2.677Z_2 - 9.825) \\ &\quad + 0.039(2.677Z_2 - 9.825)(2.886Z_3 + 3.644) \\ &= -1.306 + 0.314Z_1 + 0.353Z_2 + 0.039(2.677Z_2 \\ &\quad - 9.825)(2.886Z_3 + 3.644), \\ R_s &= 0.271\hat{t}_e^{0.314} \cdot t_i^{0.353} \cdot e^{0.039(2.677\ln t_i - 9.825)(2.886\ln \lambda + 3.644)}. \end{aligned} \quad (4)$$

以上生产率指标与表面粗糙度指标的预报模型均在  $\alpha=0.01$  上显著. 式(3), (4)与式(1), (2)不完全类似,这是 LD 钢电火花线切割加工的自身规律.

由  $V_w$  和  $R_s$  的预报模型可以看到,生产率指标主要由峰值电流大小和占空比大小决定,而与脉冲宽度大小关系不大. 表面粗糙度指标则主要由峰值电流大小和脉冲宽度决定. 脉冲宽度与占空比的交互作用对表面粗糙度指标有影响,但并不很显著. 如果把脉冲宽度与占空比的交互作用对表面粗糙度指标的影响忽略不计,即把式(4)简化为

$$R_s = 0.271\hat{t}_e^{0.314} \cdot t_i^{0.353}. \quad (5)$$

1 通过计算可知,简化后的模型其误差范围在 8% 以内. 作为预报模型,这种误差还是允许的. 因此,在一般情况下,可以采用式(3)和式(5)预报 LD 钢的电火花线切割加工工艺指标.

## 4 结束语

(1) LD 钢的电火花线切割加工的生产率,主要由峰值电流大小与占空比大小决定,其中受峰值电流大小的影响更为明显;表面粗糙度主要由峰值电流大小与脉冲宽度决定,而且两者

对表面粗糙度指标的影响程度很接近。

(2) 脉冲宽度大小对生产率指标影响甚微,可不予考虑,但减小脉冲宽度可以大大降低表面粗糙度。因此在选择加工参数时,应尽量选择小脉宽加工。

(3) 增大电流峰值,可以提高生产率,但同时增大表面粗糙度。因此,在选择电流规准时,应根据工艺要求,慎重选择电流档。

(4) 如果把脉冲宽度与占空比的交互作用对表面粗糙度的影响考虑在内,此时,为了尽最大可能降低表面粗糙度,当脉冲宽度取较大值时,占空比应取较小值;反之,当脉冲宽度取较小值时,占空比应取较大值。

(5) 试验研究结果表明,LD 钢的电火花线切割加工的工艺规律有其特殊性。工艺参数总的优化趋势应当是选择小脉宽加工,其相应的占空比则应取较大值。

### 参 考 文 献

- 1 严锡藩. 高强韧性冷作模具钢——7Cr7Mo3V2Si. 上海金属, 1983, 5(4): 20~25
- 2 刘晋春, 陆纪培. 特种加工. 北京: 机械工业出版社, 1987. 11~21

## A Pilot Study on the Technological Regular Pattern of LD Steel in Electrospark Wire-Electrode Cutting

Jiang Kaiyong

(Dept. of Precis. Mech. Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** A study of the preferred processing parameters is made on LD steel, a new die steel, submitting for electrospark wire-electrode cutting. The author investigates the relation between its processing parameters and its technological indices; and probes into regular pattern of its fundamental technology; and thus obtains a prediction model concerning indices of productive rate and surface roughness. These results afford a basis for optimizing the processing parameters of LD steel in electrospark wire-electrode cutting.

**Keywords** LD steel, electrospark wire-electrode cutting, technology, forecasting