

耐热合金钢切削参数优化的试验研究

沈 沛 如

(机 械 系)

提 要

耐热合金钢是制造化工设备的重要材料,它的高温强度大,加工困难,刀具耐用度低。本文从建立切削力和刀具耐用度的数学模型着手,通过程序设计,用电子计算机对耐热钢的切削参数进行了优化,其结果对生产具有一定的指导意义。

一、 引 言

近代科学技术的发展依赖于新材料、新工艺的开发和应用。在化工设备制造工业中为了满足高温、高压和耐腐蚀的要求,大量使用铬钼合金钢,活塞杆是往复式压缩机和往复式泵的重要另件之一,南京某化工机械厂生产的活塞杆采用耐热合金钢38CrMoAl做成的。这种材料经调质处理后,韧性大、高温强度高,断屑困难,经气体氮化处理后表面硬度高,刀具耐用度低。因此研究这种材料调质后的切削机理和加工性能,合理选择刀具材料和切削参数对提高生产效率具有很大的实际意义。

本文从建立切削力、刀具耐用度和切削用量的关系着手,找出与之相关的约束条件,然后以最小的机动时间为目标函数,以机床,刀具和加工系统的具体参数为约束条件,进行了用电子计算机优化切削参数的程序设计和计算,达到了提高生产率和降低成本的目的。

二、 铬钼铝钢的性能分析

铬钼铝钢(38CrMoAl)是一种耐热合金钢,它含有下列合金元素:

C: 0.35~0.42%	Cr: 1.35~1.65%
Mo: 0.15~0.25%	Al: 0.70~1.10%

铬的主要作用是增加钢的淬透性。铬能显著地使淬火和高温回火后的组织得到强化,提高钢在高温使用时的强度并细化晶粒,消除回火脆性。铬钼配合使用还可提高调质后的冲击韧性。铝能加速38CrMoAl钢的氮化过程,使Cr、Mo、Al等合金元素与氮元素化合形成颗粒细密,分布均匀,硬度很高而且非常稳定的氮化物,以提高另件的耐腐蚀性和耐磨性。

这种合金钢具有下列机械性能:

硬度 $H_B = 227$

抗拉强度 $\sigma_b = 100 \text{ kg/mm}^2$

延伸率 $\delta = 14\%$

冲击值 $\alpha_K = 9 \text{ kgm/cm}^2$

导热系数 $\lambda = 0.009 \text{ Cal/cm} \cdot \text{s}$

可以看出它的硬度和强度比中碳钢稍高,但主要是韧性大,导热性差,因此切削时切削力大、断屑困难,切削热集中在刀刃附近,刀具容易磨损,耐用度较低。

三、通过试验建立切削力的数学模型

本试验在CA6140型车床上进行,采用机夹可转位式硬度合金车刀,刀片牌号为YW3有较好的抗粘附性和耐磨性,刀具几何角度为: $\gamma_0 = 14^\circ$, $\lambda_s = -4^\circ$, $\alpha_0 = 6^\circ$, $\alpha'_0 = 4^\circ$, $K_\gamma = K'_\gamma = 45^\circ$

试验方法:采用电阻式八角环测力仪测量切削力,以八角环作弹性元件,由测力仪输出的电压信号经过应变仪放大后,再用函数记录仪记录下来如图1所示

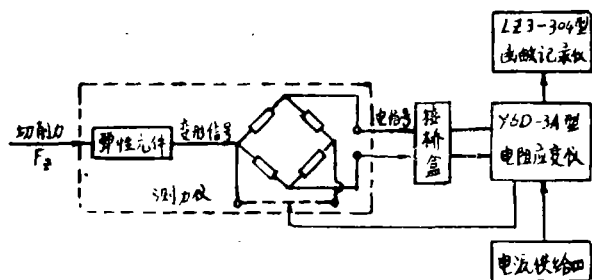


图1 切削力测试框图

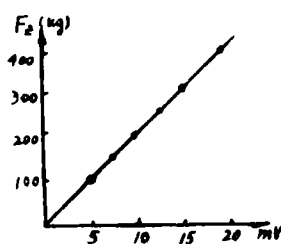


图2 切削力标定曲线

由函数记录仪读出的是输出的毫伏值,然后用测力计进行标定,画出标定曲线如图2所示,即可求出各点切削力的具体数值。

本试验采用正交设计,所选择的试验点符合正交性要求,取 a_p , f , v 为试验因素,根据现场调查并结合实际条件试验时各因素水平如表1所示:

表1. 试验时各因素水平表

序 号	因 素	水 平		
		低水平	中水平	高水平
1	切削深度 a_p (mm)	1	1.7	3
2	进给量 f (mm/r)	0.1	0.2	0.41
3	切削速度 v (m/min)	50	80	125

加工铬铝钢时的切削力一般可用幂函数形式表示如下:

$$F_z = C_{Fz} \cdot a_p^{x_{Fz}} \cdot f^{y_{Fz}} \cdot v^{n_{Fz}}$$

其对数式为: $\lg F_z = \lg C_{Fz} + x_{Fz} \lg a_p + y_{Fz} \lg f + n_{Fz} \lg v$

变换后得: $Y = b' + m_1' x_1 + m_2' x_2 + m_3' x_3$

为了便于计算应将各因素所取的水平在确定的试验范围内进行编码; 各因素水平编码所用的坐标变换式为:

$$X_1 = \frac{2(\lg c_p - \lg 3)}{\lg 3 - \lg 1} + 1$$

$$X_2 = \frac{2(\lg f - \lg 0.41)}{\lg 0.41 - \lg 0.1} + 1$$

$$X_3 = \frac{2(\lg v - \lg 125)}{\lg 125 - \lg 50} + 1$$

试验方案及切削力测定结果如表2所示

表2 切削力 F_z 试验方案及数据

编 号	a_p (mm)		f (mm/r)		V (m/min)		F_z (kgf)	
	水平	数值	水平	数值	水平	数值	水平	数值
1	a_{p1}	1	f_1	0.1	V_1	50	F_{z1}	70
2	a_{p1}	1	f_2	0.2	V_2	80	F_{z2}	90
3	a_{p1}	1	f_3	0.41	V_3	125	F_{z3}	150
4	a_{p2}	1.73	f_1	0.1	V_2	80	F_{z4}	120
5	a_{p2}	1.73	f_2	0.2	V_3	125	F_{z5}	160
6	a_{p2}	1.73	f_3	0.41	V_1	50	F_{z6}	280
7	a_{p3}	3	f_1	0.1	V_3	125	F_{z7}	180
8	a_{p3}	3	f_2	0.2	V_1	50	F_{z8}	320
9	a_{p3}	3	f_3	0.41	V_2	80	F_{z9}	390

经编码后可得: $\hat{Y} = b + m_1 X_1 + m_2 X_2 + m_3 X_3$, 用回归计算法可求得式中的 b , m_1 , m_2 , m_3 的数值

即: $\hat{Y} = 2.228 + 0.229X_1 + 0.173X_2 - 0.027X_3$

将编码坐标变换式代入上式进行解码计算则得:

$$Y = 2.647 + 0.961 \lg a_p + 0.561 \lg f - 0.1361 \lg v$$

故得切削力的数学模型为:

$$F_z = 443a_p^{0.998} \cdot f^{0.566} \cdot v^{-0.136}$$

切削力的方差分析: 计算结果如表 3 所示

表 3 切削力 F_z 的方差分析

变差来源	平方和	自由度	均 方	F	显著性
回 归	0.498	3	0.166	138	**
剩 余	0.006	5	0.0012		
总 计	0.504	8			

查F分布表 $\alpha = 0.01$, $N_1 = 3$, $N_2 = 5$ 时,

$F_{3:5:0.01} = 12.1$ $F = 138 > F_{3:5:0.01}$ 可见回归是高度显著的。

从切削力公式可以看出: 增大切削深度则切削力显著增大, 当增大进给量时切削力增加较小, 这是因为切屑变形减小使单位切削力下降, 而且由于它韧性较大, 因此要比普通碳素钢更为敏感。当增大切削速度时切削力反而下降, 这是由于温度升高前刀面的磨擦系数减小而使变形减小, 导致切削力的降低。

四、 建立刀具耐用度的数学模型

刀具耐用度是进行切削用量优化的主要约束条件之一, 它与切削用量的关系随材料的成分和机械性能而异, 心须通过切削试验加以确定, 本试验在CA6140型车床上进行, 车床传动部分经过改装, 用JZT62—4型电磁调速电机进行无级调速。刀具采用机夹可转位式硬质合金车刀与切削力试验相同。刀具后刀面磨损量用15J型测量显微镜测量, 磨钝标准采用ISO标准, 即 $V_B = 0.3\text{mm}$ 。

试验方法与步骤: 本试验采用单因素试验法, 即在进行每一组试验时只改变一个因素, (如 v) 其它因素 (如 f , a_p) 固定不变, 分别求出 v_1, v_2, v_3, \dots 时对应的刀具耐用度 t_1, t_2, t_3, \dots 等。然后在双对数坐标纸上定出 (t_1, v_1) (t_2, v_2) (t_3, v_3) \dots 等点如图 3 所示, 因此可用下列方程式表示之:

$$\lg v = \lg A - m \lg t \quad (\text{式中 } m = \lg \phi)$$

故得 $v-t$ 关系式为: $v t^m = A$

用同样方法可得: $f t^n = B$

$$a_p t^p = C$$

综合以上三式可得刀具耐用度公式如下:

$$t = \frac{C v}{v^{\frac{1}{m}} f^{\frac{1}{n}} a_p^{\frac{1}{p}}}$$

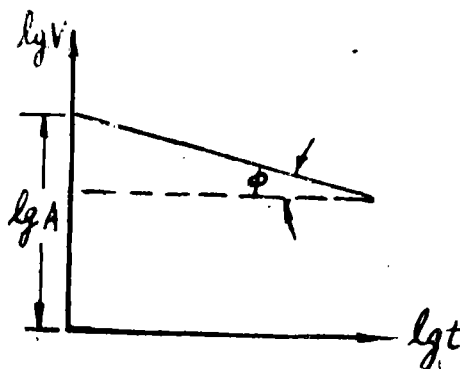


图3

试验结果如图4所示

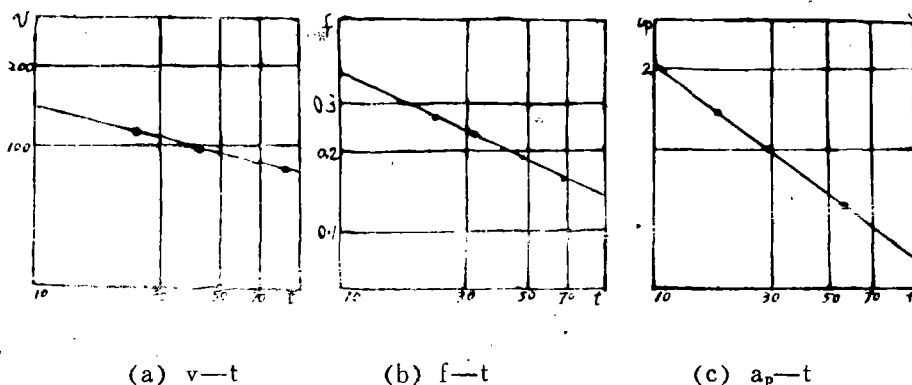


图4 切削用量与耐用度的关系

由图4可得:

$$v \cdot t^{0.24} = 248$$

$$\frac{1}{m} = 4.167$$

$$f \cdot t^{0.488} = 1.38$$

$$\frac{1}{n} = 2.05$$

$$a_p \cdot t^{0.795} = 23.2$$

$$\frac{1}{p} = 1.257$$

因此 v, f, a_p 对 t 的综合关系式为:

$$t = \frac{3.405 \times 10^8}{v^{4.167} f^{2.05} a_p^{1.257}}$$

从上式可以看出: 切削速度对耐用度的影响最大, 其次是进给量, 而切削深度影响最小, 这与理论分析是一致的。

上式两端同乘 m 次方 ($m = 0.24$), 则得:

$$v = \frac{112}{t^{0.24} f^{0.49} a_p^{0.30}}$$

五、切削过程的优化

通过前面一系列的试验, 我们建立了切削力和刀具耐用度与切削用量的关系式, 它为我们进行切削参数的优化提供了必要的约束条件。

(一) 优化目标与目标函数的确定

由切削原理可知: 完成一个工序所需要的工时 t_w 为:

$$t_w = t_m + t_{ct} + \frac{t_m}{t} + t_{ot}$$

式中: t_m ——工序的机动时间

t_{ct} ——换刀一次所消耗的时间

t_{ot} ——其它辅助时间

若以最大生产率为优化目标,则必须使单件工时 t_s 为最小,另外从经济性方面来看,每个工件的工序成本 C 为:

$$C = t_m M + t_{ct} \cdot \frac{t_n}{t} M + \frac{t_m}{t} C_t + t_{ot} \cdot M$$

式中: C ——工序的生产成本

M ——该工序单位时间内所分担的全厂开支

C_t ——磨刀成本,即刀具成本

若以工序成本最低为优化目标则必须使 C 值为最小,从以上两式可以看出:当其它条件一定时,如果能使机动时间 $t_m = \frac{1}{n \cdot f}$ 减小,那么就能提高生产率降低加工成本。因此我们

把机动时间 t_m 作为进行切削参数优化的目标函数。

(二) 确定约束条件

如上所述要使优化目标函数值最小,必须使机床转速 n 与进给量 f 的乘积为最大,但它们受到很多条件的制约,如机床、刀具和工艺系统的技术条件和加工的技术要求等。常见的有下列几方面:

最小进给量 R_{f1} : 受机床可能实现的最小进给量的限制。

最大进给量 R_{f2} : 受工件表面光洁度、工件刚度、刀具强度和刚度及机床最大进给量限制。

最低转速 R_{v3} : 受机床的最低转速的限制。

最高转速 R_{v4} : 受机床的最高转速的限制。

最大功率 R_{p5} : 受机床电机功率的限制。

刀具耐用度 R_{T6} : 最高切削速度受刀具耐用度的限制。

通过以上分析可知:

目标函数必须在图5所示的区域内(或边界上)进行优化。

以上这些约束条件都是以不等式的形式出现,主要的有:

1、车刀切削性能的限制

$$v = \frac{\pi d_w \cdot n}{1000} \leq \frac{C_v \cdot K_v}{t^m \cdot f^{f_v} \cdot a_p^{x_v}}$$

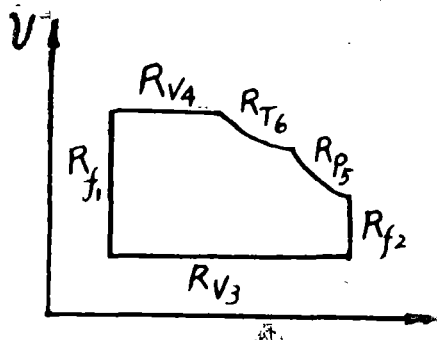


图5 约束条件允许的切削用量范围

式中 K_v ——切削速度修正系数, $y_v = \frac{m}{n}$, $x_v = \frac{m}{p}$,

简化后得:

$$n \cdot f^{F_z} \leq \frac{318 \cdot c_v \cdot K_v}{d_w \cdot t^m \cdot a_p^{x_v}}$$

2、机床有效功率的限制

$$p_m = \frac{F_z \cdot v}{6120} = \frac{c_{F_z} \cdot a_p^{x_{F_z}} \cdot f^{F_z} \cdot k_{F_z} \cdot \pi \cdot d_w \cdot n}{6120 \times 1000} \leq p_e \cdot \eta$$

式中 p_e ——机床电机功率; η ——机床传动效率

简化后得:

$$n \cdot f^{F_z} \leq \frac{1948056 p_e \cdot \eta}{c_{F_z} \cdot a_p^{x_{F_z}} \cdot d_w \cdot k_{F_z}}$$

3、机床进给系统所允许的最大切削力的限制

$$F_x = 0.45 F_z = 0.45 c_{F_z} \cdot a_p^{x_{F_z}} \cdot f^{F_z} \cdot k_{F_z} \leq F_{x \text{ 允许}}$$

式中 $F_{x \text{ 允许}}$ ——机床所允许的最大走刀抗力

故得:

$$f^{F_z} \leq \frac{F_{x \text{ 允许}}}{0.45 c_{F_z} \cdot a_p^{x_{F_z}} \cdot k_{F_z}}$$

4、刀杆强度的限制 (图 6)

$$F_z = C_{F_z} \cdot a_p^{x_{F_z}} \cdot f^{F_z} \cdot k_{F_z} \leq \frac{BH^2[\sigma]}{6 \times l}$$

式中 $[\sigma]$ ——许用弯曲应力

故得:

$$f^{F_z} \leq \frac{BH^2[\sigma]}{6 \times l \cdot c_{F_z} \cdot a_p^{x_{F_z}} \cdot k_{F_z}}$$

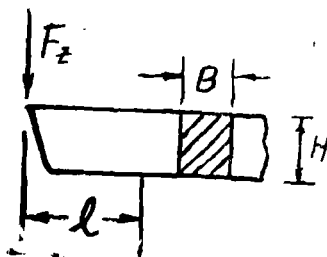


图6

5、刀杆刚度的限制

$$y_1 = \frac{F_z \cdot l^3}{3EI} = \frac{12 c_{F_z} \cdot a_p^{x_{F_z}} \cdot f^{F_z} \cdot l^3}{3E \cdot BH^3} \leq [y_1]$$

式中 $[y_1]$ ——工件加工精度所允许的刀杆挠度值

E ——刀杆材料的弹性模量

I ——刀杆的惯性矩 ($I = \frac{BH^3}{12}$)

故得:

$$f^{F_z} \leq \frac{E \cdot BH^3 [y_1]}{4 c_{F_z} \cdot a_p^{x_{F_z}} \cdot k_{F_z} \cdot l^3}$$

6、工件刚度的限制

$$y_2 = \frac{F_y \cdot L^3}{Q \cdot E \cdot I} \leq [y_2]$$

式中 $[y_2]$ ——工件加工精度所允许的工件挠度值

I ——工件惯性矩 ($I = \frac{\pi d_w^4}{64} \approx 0.05 d_w^4$)

Q ——与工件装夹方式有关的系数

当工件用卡盘装夹时 $Q = 3$

工件用两顶尖装夹时 $Q = 70$

工件一端用卡盘, 另一端用顶尖装夹时 $Q = 135$

简化后得:
$$f_{yz} \leq \frac{0.05 d_w^4 \cdot Q \cdot E \cdot [y_2]}{0.45 L^3 \cdot c_{Fz} \cdot a_p^{x_{Fz}} \cdot k_{Fz}}$$

7、工件加工表面所允许的不平度的限制

$$R_a = \frac{f - r_g(t_g \cdot \frac{k_I}{2} + t_g \cdot \frac{k'_I}{2})}{4(ct_g k_I + ct_g k'_I)} \leq R_{a\text{允许}}$$

式中 R_a ——工件表面不平度算术平均偏差值

8、受机床进给量的限制

$$f_{\max} \geq f \geq f_{\min}$$

9、受机床主轴转速的限制

$$n_{\max} \geq n \geq n_{\min}$$

(三) 数学模型的建立

根据约束条件的不等式就可以建立优化切削参数的数学模型。由线性规划原理可知: 由各约束条件的线性不等式所构成的凸多边形构成了目标函数的定义域(可行区间), 函数的极大或极小值必存在于可行区的边界上, 其某个角点的函数值必定是最大值或最小值。本文在求解这一线性规划问题时, 利用了电子计算机找到了最优化方案, 使切削参数 f 和 n 得到了最佳的组合。

在建立数学模型时要注意两点: 1. 约束条件的曲线化直问题, 即必须把约束条件不等式取成对数使它们线性化, 2. 自变量的非负值要求, 为避免约束条件中的自变量在取对数后成为负值, 应使它的值大于1。考虑到车床上的进给量 f 常小于1, 因此取 $100f$ 作为进给量的运算值。

根据以上要求得出约束条件的表达式和数学模型如表4所示

以上各式在坐标平面 x_1, x_2 内都可以用直线表示, 这些直线除有的是互相平行没有交点外, 都可以相互交叉而得到若干个交点, 这个闭合多边形的角点的坐标就是联立方程式的根, 比较这些角点的座标 x_1 和 x_2 的乘积的大小, 其中乘积为最大值的某个角点的座标值就是切削参数的最优化方案。然后再进行反对数运算, 得出转速和进给量的最佳值。

$$\text{最佳转速} \quad n_{\text{最佳}} = e^{x_1 \text{最佳}}$$

$$\text{最佳进给量 } f_{\text{最佳}} = \frac{1}{100} e^{x_2 \text{最佳}}$$

表 4 线性表达式与数学模型

序号	线性表达式	数学模型
1	$l_n + y_v l_n(100f) \leq l_n \frac{318 C_v \cdot k_v 100^{y_v}}{d_w t^m a_p^{x_v}}$	$x_1 + y_v x_2 \leq b_1$
2	$l_n + y_{Fz} l_n(100f) \leq l_n \frac{1948056 p_c \cdot \eta \cdot 100^{y_v}}{c_{Fz} \cdot a_p^{x_{Fz}} \cdot d_w \cdot k_{Fz}}$	$x_1 + y_{Fz} x_2 \leq b_2$
3	$y_{Fz} l_n(100f) \leq l_n \frac{F_{x\text{允许}} \times 100^{y_{Fz}}}{0.45 c_{Fz} \cdot a_p^{x_{Fz}} \cdot k_{Fz}}$	$y_{Fz} x_2 \leq b_3$
4	$y_{Fz} l_n(100f) \leq l_n \frac{B H^2 [6] \cdot 100^{y_{Fz}}}{6 l c_{Fz} \cdot a_p^{x_{Fz}} \cdot k_{Fz}}$	$y_{Fz} x_2 \leq b_4$
5	$y_{Fz} l_n(100f) \leq l_n \frac{E \cdot B \cdot H^3 [y_1] \cdot 100^{y_{Fz}}}{4 l^3 \cdot c_{Fz} \cdot a_p^{x_{Fz}} \cdot k_{Fz}}$	$y_{Fz} x_2 \leq b_5$
6	$y_{Fz} l_n(100f) \leq l_n \frac{0.05 d_w^4 Q \cdot E [y_2] 100^{y_{Fz}}}{0.45 L^3 c_{Fz} \cdot a_p^{x_{Fz}} \cdot k_{Fz}}$	$y_{Fz} x_2 \leq b_6$
7	$l_n(100f) \leq l_n \{100 [R_{\text{允许}} \cdot 4 (ct_k k_v + ct_k k'_v) + \gamma \varepsilon (t_k \frac{k_f}{2} + t_k \frac{k'_f}{2})]\}$	$x_2 \leq b_7$
8	$l_n(100f) \leq l_n(100f_{\max})$	$x_2 \leq b_8$
9	$l_n \leq l_{n\max}$	$x_1 \leq b_9$
10	$l_n(100f) \geq l_n(100f_{\min})$	$x_2 \geq b_{10}$
11	$l_n \geq l_{n\min}$	$x_1 \geq b_{11}$

(四) 切削参数优化的程序设计

通过以上分析, 根据线性规划原理可以设计出应用电子计算机优化切削参数的程序框图如图7所示(图中符号和数值列于表5中)

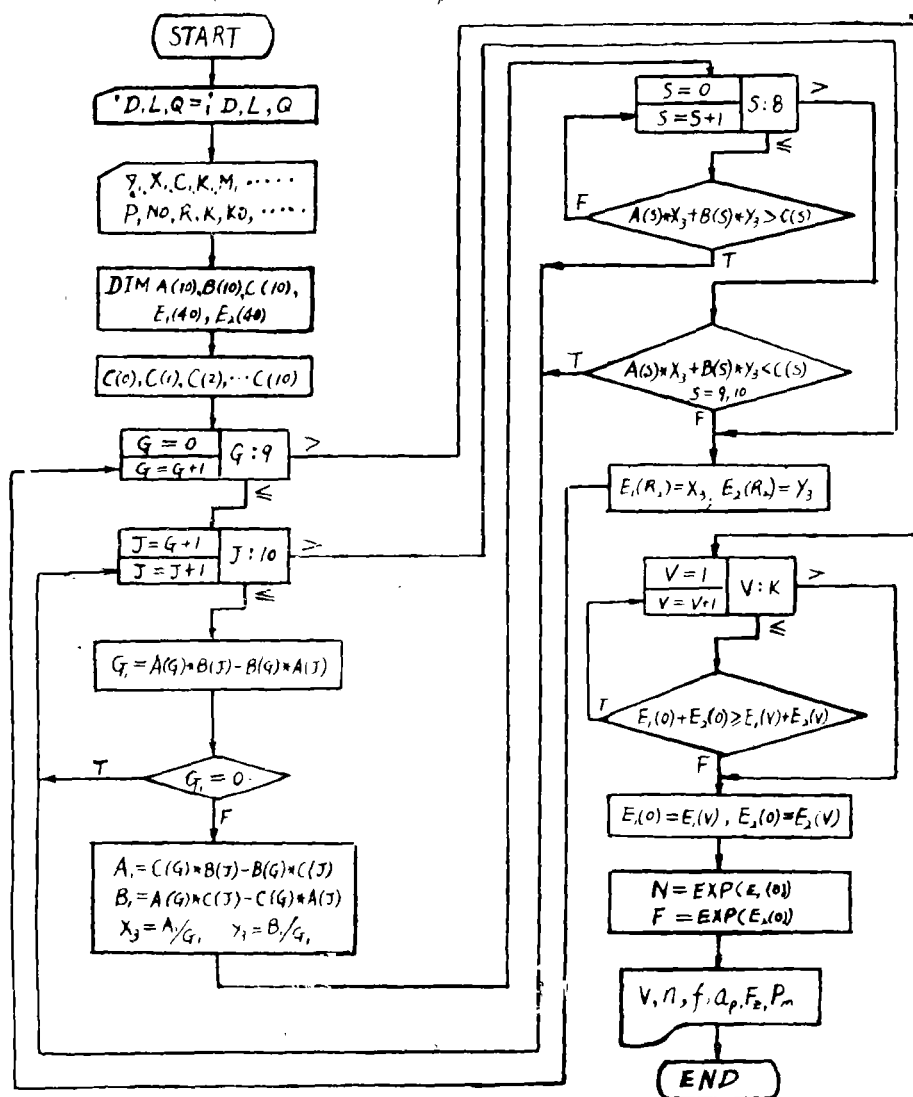


图7 切削参数优化程序框图

表5 各约束条件中的符号和程序设计中符号及数值

约束条件中的符号	程序设计中的符号	数 值	约束条件中的符号	程序设计中的符号	数 值
γ	γ_1	0.49	K_r	K	0.785
x	x_1	0.30	K'_r	KO	0.785
c	c_1	112	$[\sigma]$	X	23

Kv	K ₁	1	B	B	20
m	M ₁	0.24	H	H	25
yFz	Y ₂	0.56	1	L ₁	40
XFz	X ₂	0.96	[y ₁]	y	0.050
cFz	c ₂	240	[y ₂]	y ₀	0.022
KFz	K ₂	1	t	T	60
E	E	2.1×10 ⁴	n _{min}	N ₁	10
F _χ 允许	P ₁	360	n _{max}	N ₂	1400
[Ra]	R ₁	0.005	f _{min}	F ₁	0.028
Pe	P	7.5	f _{max}	F ₂	1.59
η	EO	0.85			
f _s	R	1			

现将计算结果列表如下:

工件材料	工件直径 (mm)	工件长度 (mm)	装夹方式 Q	切削深度 (mm)	进给量 (mm/r)	切削速度 (m/min)	转 (r/min)	切削力 (kg)	切削功率 (kw)
铬 钼 铝 钢		800	135	1	0.87	44.9	178.6	221.7	1.63
			135	2	0.87	36.5	145.1	431.3	2.57
			135	3	0.68	36.5	145	554.4	3.30
		1000	135	1	0.87	44.9	178.6	221.7	1.63
			135	2	0.41	52.6	209.2	283.9	2.44
			135	3	0.21	65.5	260.4	283.9	3.04
	80	800	70	1	0.87	44.9	178.6	221.7	1.63
			70	2	0.42	52.0	206.9	287.5	2.44
			70	3	0.21	64.7	257.6	287.5	3.04
		1000	70	1	0.42	64.2	255.6	147.2	1.55
			70	2	0.13	93.4	371.7	147.2	2.25
			70	3	0.064	116.3	462.7	147.2	2.80

	250	3	1	0.87	44.6	178.6	221.7	1.63
		3	2	0.77	38.6	153.7	403.7	2.55
		3	3	0.38	48.1	191.3	403.7	3.17
		3	1	0.87	44.9	178.6	221.7	1.63
300		3	2	0.028	196.2	780.5	63.0	2.02
		3	3	0.14	77.6	308.8	233.6	2.96

六、小 结

1、通过切削试验建立了铬钼铝钢的切削力和刀具耐用度的数学模型，与理论分析是一致的。为切削用量优化提供了实际的约束条件。

2、用电子计算机经编程计算，可以迅速得出具体加工条件下的最佳切削用量，与目前生产中应用的数值基本一致或稍有提高。本文列出的部分优化结果对指导生产有一定意义。

3、优化数据是在 $t = 60$ 分钟情况下获得的，如果减小刀具耐用度则切削用量还可提高。

4、所编的电算程序对不同的工件材料和加工条件可以输入不同的参数值，能很快得到相应的结果，缩短了制订另件工艺的时间。

5、本文仅限于一个工序切削用量的优化，如其他费用有具体材料可查，则可扩大到整个切削过程的优化。

（参加试验工作的有郭保华、张国胜、何吉林等，并得到切削实验室同志的协助。）

参 考 文 献

- [1] 南京工学院，无锡轻工学院主编 金属切削原理
- [2] 韩克筠编 金属材料可切削性与刀具
- [3] H.N.列兹尼科夫等 高强度钢高温合金和钛合金的切削加工
- [4] 陈诚斋：切削过程最佳化
- [5] 肖训球等编 刀具几何基本原理与程序设计