

陶瓷的激光打孔及加工参数的优化

李 儒 荀

(机械系)

摘 要

本文建立了在陶瓷材料上用激光打孔的数学模型,分析了激光打孔的规律以及加工参数的优化方法。

关键词: 加工机理; 试验计划; 数学模型; 加工规律; 优化方法

陶瓷材料是工厂企业和民用广泛采用的材料之一,但由于本身具有硬度高而易碎等特点,故用一般传统的切削加工方法很难保证加生产率和产品质量。因此,采用激光工艺来完成精微加工工序,特别是在陶瓷、玻璃等易碎材料上加工小尺寸的细孔以及工艺性的雕刻,更具有很大的现实意义。

笔者曾于1986~1987年,在苏联基辅工学院激光工艺实验室,在著名学者,激光加工专家B、C、柯瓦连科教授的指导和合作下,进行了激光加工的试验研究。现将陶瓷材料上用激光打孔的部分研究结果简述如下。

被加工材料为22×C(苏联牌号)。所采用的试验设备是基辅工学院自行设计和改装的激光加工试验台KIIIИ-5。它的工作原理如图1所示。

研究指出,激光加工的机理是基于利用聚焦的激光射线作为热源,使被加工材料加工区受热,熔化和气化。而孔的加深主要靠气化机理;而孔径的扩大主要靠孔壁的熔化和在所形成的蒸气压力下,液相材料的排出。

从工艺用量来考虑,用脉冲激光射线打孔时,孔的尺寸参数,微观几何形状和表面粗糙度主要决定于以下参数:脉冲数量 n ,激光脉冲的功率密度 W 。(它又决定于激光脉冲能量和激光脉冲持续时间 τ 。但在一般工业用激光脉冲打孔机和我们进行试验时, $\tau-E$ 是固定的),聚焦系统的焦距 F 以及聚焦系统焦平面相对工作表面的位移 ΔF 。(我们认为,物镜焦点位于试件表面上方, ΔF 为“+”,焦点位于试件表面上 $\Delta F=0$,焦点位于试件体内 ΔF 为“-”)

这里必须指出,孔的直径和深度的增长幅度是随能量 E 改变的方法不同而改变的。一般有三种改变激光脉冲能量的方法:改变抽运能量(即控制电源电压或储能器电容);采用各种尺寸和颜色的滤光片;改变激光射线的光圈。实验证明,在相同能量数值 E 下,用改变抽运能量和改变光圈的办所得到的孔径比使用滤光片时得到的小,特别在低能区,这些差别

更大。这是因为改变光圈会使激光射线的发散度减小。而改变抽运能量时，无论射线的发散度，还是光脉冲的持续时间都小了。对于孔深的影响也类似，改变抽运能量使射线的发散度减小，光斑内的功率密度加大，故得到的孔深比使用滤光片时得到的大。但光圈的变化（当抽运能量一定时），只影响射线的总发散度和射线束的直径，而不改变射线横截面内功率密度的分布。而孔深主要决定于射线的功率密度，所以改变光圈对孔深的影响不大。使用滤光片时，它能改变能量 E 的大小，而对光脉冲的持续时间影响不大，也不影响射线的发散度，所以在低能区加工时最好使用滤光片来改变激光射线的能量。但使用滤光片时，能量的变化是有级的，它决定于所使用的滤光片尺寸的排列和颜色的搭配。在我们的试验中，采用滤光片12（见图1）来改变激光脉冲能量的大小。

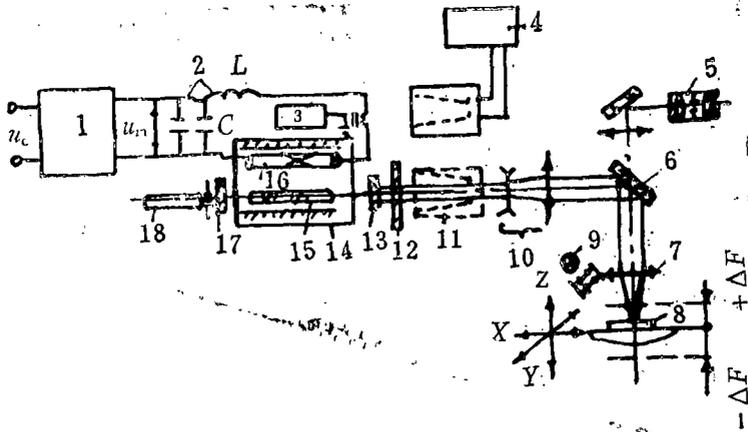


图 1

为了寻找激光在陶瓷材料上打孔的规律，即获得上述参数与孔径的关系式 $d = f(E, F, \Delta F, n)$ 我们采用哈尔特里(Хармлѣ)试验计划来排试验，这能用较少的试验次数获得较为理想的试验结果。其因素空间如表1所示

表 1

水 平	u_1 E (焦耳)	u_2 F (毫米)	u_3 ΔF (毫米)	u_4 n
上水平 +1	6.2	70	0.5	4
零(基)水平 0	3.8	50	0	2
下水平 -1	1.4	30	-0.5	0
间距 Δu_i	2.4	20	0.5	2

其试验矩阵与试验结果如表2所示。

表 2

N°	N'	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₁ X ₄	X ₂ X ₃	X ₂ X ₄	X ₃ X ₄	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	X ₄ ²	d _r MM	d _c MM
1	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.293	0.813
2	5	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	+	0.178	0.182
3	14	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	0.255	0.141
4	16	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	0.053	0.066
5	2	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	0.189	0.17 ⁷
6	3	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	0.150	0.117
7	15	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	0.149	0.090
8	17	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	0.067	0.054
9	6	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0.305	0.272
10	10	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0.117	0.171
11	4	+	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0.292	0.243
12	12	+	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0.225	0.138
13	13	+	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0.140	0.219
14	11	+	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0.173	0.202
15	7	+	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0.285	0.245
16	8	+	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0.290	0.117
17	9	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.250	0.215

N°—试验号, N'—试验顺序

通过对试验结果(见表2)的统计分析(校验方差的齐次性, 回归系数的显著性以及数学模型的符合性), 对于我们的试验可求得如下的数学模型:

孔的入口直径

$$d_r = 0.250 + 0.094x_1 + 0.034x_2 + 0.022x_4 + 0.025x_1x_4 - 0.039x_2x_3 - 0.0038x_1^2 - 0.093x_3^2 + 0.038x_4^2 + (0.093x_3) \quad (1)$$

孔的出口直径

$$d_c = 0.219 + 0.051x_1 + 0.053x_2 + 0.04x_4 + 0.018x_1x_4 - 0.03x_2^2 - 0.039x_4^2 + (0.009x_3 + 0.005x_3x_4 + 0.003x_1x_3 - 0.012x_2x_3 - 0.009x_3^2) \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} x_1 = (E - 3.8) / 2.4 \\ x_2 = (F - 50) / 20 \\ x_3 = (\Delta F - 0) / 0.5 \\ x_4 = (n - 2) / 2 \end{cases} \quad (3)$$

在上述方程中, 括号内的回归系数是不显著的, 只有研究参数 ΔF 对孔直径的影响时才

利用它们。

从以上方程可以看出，对入口直径 d_i 影响最大的是 x_1 (激光脉冲能量)，因为它的系数最大，其次，相应的为 x_2, x_4 。对出口直径影响大小的次序为： x_2, x_1, x_4 。而 x_3 对孔径的影响是比较特殊的。

为详细研究每个变量 x_i 对孔径的影响，我们在方程(1)(2)中固定任意三个变量而求另一个变量与孔径的关系 $y_i = f(x_i)(i=1, 2, 3, 4)$ 。从方程(1)(2)可以看出将得到一束 $y_i = ax_i^2 + bx_i + c$ 型的抛物线方程(其顶点为 $B(-b/2a, (4ac - b^2)/4a)$ 或一束直线 $y_i = bx_i + c$ ，斜率 $k = \tan \alpha_i = b$ ，斜角 $\alpha_i = \tan^{-1} b$ 。如果在试验中心研究，所有这些曲线都有公共点A(0, b_0) (其中 b_0 是方程(1)(2)中的常数项)。

例如，在试验中心，入口直径为

$$\left\{ \begin{aligned} d_i(E) &= 0.250 + 0.094x_1 - 0.038x_1^2 \quad (x_2 = x_3 = x_4 = 0, \text{ 相应的为 } F = 60\text{mm}, \Delta F = 0, n = 2), \text{ 这是一条抛物线, 凹向下, 顶点为 } B(1.24, 0.38) \\ d_i(F) &= 0.250 + 0.034x_2 \quad (x_1 = x_3 = x_4 = 0, \text{ 相应 } E = 3.8\text{J}, \Delta F = 0, n = 2), \text{ 这是直线方程} \\ d_i(\Delta F) &= 0.250 - 0.017x_3 - 0.093x_3^2 \quad (x_1 = x_2 = x_4 = 0 \text{ 相应 } E = 3.8\text{J}, F = 50\text{mm}, n = 2), \text{ 抛物线, 凹向下, 顶点 } B(-0.091, 0.251) \\ d_i(n) &= 0.250 + 0.022x_4 + 0.038x_4^2 \quad (x_1 = x_2 = x_3 = 0 \text{ 相应 } E = 3.8\text{J}, F = 50\text{mm}, \Delta F = 0) \text{ 抛物线, 凹向上, 顶点 } (-0.289, 0.247) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

对于出口直径:

$$\left\{ \begin{aligned} d_e(E) &= 0.219 + 0.051x_1, \text{ 直线} \\ d_e(F) &= 0.219 + 0.053x_2 - 0.03x_2^2 - 0.003x_3^2 \text{ 抛物线, 凹向下, 顶点 } (0.883, 0.242) \\ d_e(\Delta F) &= 0.219 + 0.009x_3 - 0.009x_3^2, \text{ 抛物线, 凹向下, 顶点 } (0.5, 0.221) \\ d_e(n) &= 0.219 + 0.04x_4 - 0.039x_4^2, \text{ 抛物线, 凹向下, 顶点 } (0.513, 0.230) \end{aligned} \right. \quad (5)$$

相应于方程组(4)的图形见图2，相应于方程组(5)的图形见图3。

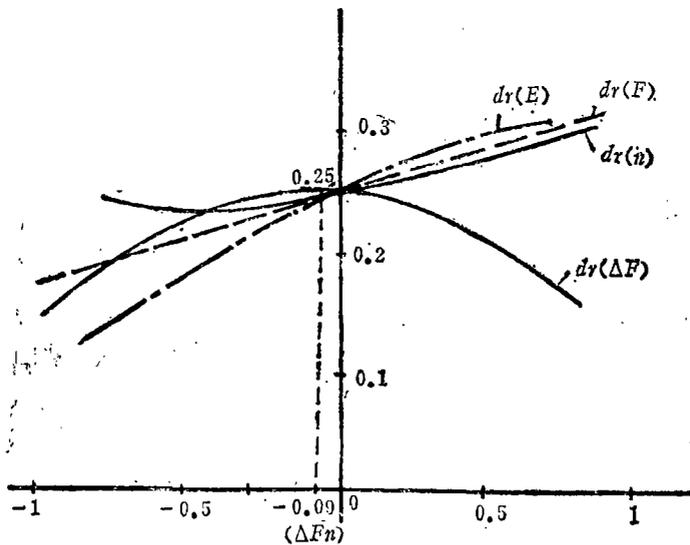


图 2

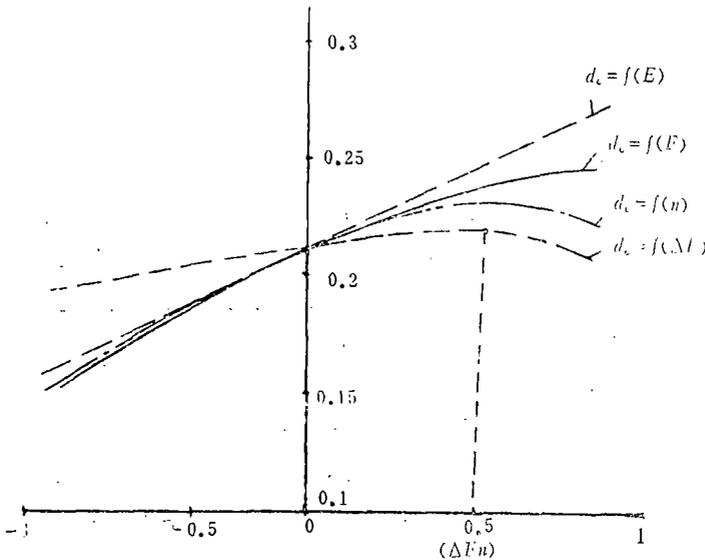


图 3

分析所得到的方程和所建立的图形可以看出,随着激光脉冲能量 E 的增加,无论孔的入口直径还是出口直径都增大,这是因为激光脉冲能量的增加,使光斑内的能量密度加大,被加工材料的气化部分增多之缘故。在我们所研究的情况下,焦距 F 的增加将引起孔径的扩大这是由于随着焦距 F 的增加,会引起聚焦光斑直径 $d_1 \approx 4\lambda F/\pi D$ 的增大(λ —波长, D —激光束直径),而光斑内各点的功率密度又都大于材料气化临界值的缘故。试验结果也表明脉冲数量 n 的增加,对孔的入口直径影响不大,而出口直径则随之增加,但幅度并不很大。这是因为孔径主要决定于单脉冲的参数,而脉冲数是影响孔深的主要因素。

出口处直径稍增加是由于射线散焦而使出口处的发散度有所增加,熔化部分增大,从而使孔径稍有增加。从图2和图3还可看出,焦面相对工件表面的位移 ΔF 也是影响孔径的重要参数,只有在某一位移值(ΔF_n)时,得到的孔径最大。对于孔的入口直径,这个位移值是负的($-\Delta F_n$),即激光射线的聚焦平面位于被加工工件表面的下部(工件体内);而对于孔的出口直径、位移量是正的(ΔF_n),即焦平面位于工件表面上方。这可简单解释如下:为了获得最大的孔径,应该把被加工工件的表面配置在焦散面内这样的位置上,使工件两端面上的射线功率密度都超过使材料气化的阈值,并要求最大孔径的一端面上,其功率密度最大。

获得上述的数字模型和建立了相应的图形之后,除如上所述,可用用来分析激光加工的规律之外,还可以解决以下三方面的问题:借助计算机,采用非线性规划、人工适应控制等方法,进行激光加工参数的优化。例如保证孔的尺寸参数符合要求,而加工用量又在允许范围内,寻找获得孔的表面粗糙度最低的加工用量或逆问题等;根据所选择(或决定)的工艺用量,决定孔的尺寸参数;与第二问题相反,给定孔的参数或对孔尺寸参数的要求,求需要的工艺用量。例如把某些因素的水平固定在一定的数值下,联立解方程(1)和(2)可找到获得圆柱孔($d_i = d_c$)的条件。若设 $x_2 = 0$ ($F = 50$ 毫米), $x_3 = 0$ ($\Delta F = 0$)则联解(1)(2)可得:

$$0.038x_1^2 - 0.077x_4^2 - 0.043x_1 + 0.018x_4 - 0.031 = 0 \quad (6)$$

根据关系式(6),可给出一参数(x_1 或 x_4)而求出获得圆柱孔的另一参数。

当然,为解决上面提出的三大问题,除利用计算机外,还可以根据数学模型建立相应的诺模图或列成相应的表格以便于应用。

如何把激光加工设备的工艺技术参数与被加工工件的技术要求密切的配合起来。即怎样组合选用激光加工设备的工艺技术参数,经过有限的(极少的)几次调试和试验,就能可靠地加工出尺寸、形状和表面质量都符合技术要求的工件,即所谓的激光加工参数的优化问题。我们曾在苏联基辅工学院激光工艺试验室进行过激光加工参数优化的试验和研究,并取得了一定的效果。下面,我们以在陶瓷材料 $22 \times C$ (苏联牌号)上加工有一定表面质量要求的小尺寸圆柱孔为例,说明我们所采用过的两种优化方法的原理。

从关系式(1)和(2)可得孔的入口直径与出口直径之差 Δd

$$\begin{aligned} \Delta d = d_c - d_r = & 0.038x_1^2 - 0.03x_2^2 + 0.093x_3^2 - 0.7077x_4^2 - 0.043x_1 \\ & + 0.019x_2 + 0.018x_3 - 0.025x_1x_4 + 0.039x_2x_3 + 0.018x_2x_4 \\ & - 0.031 \end{aligned} \quad (7)$$

利用关系式(3)把上式变换成用实际加工参数表示的方程

$$\begin{aligned} \Delta d = & 0.00684E^2 - 0.000075F^2 + 0.372F^2 - 0.01925n^2 - 0.05814E \\ & 0.006505F + 0.03225n - 0.00525En + 0.0039F \cdot \Delta F + 0.00045F \cdot n \\ & - 0.2925 = f(E, \Delta F, F, n) \end{aligned} \quad (8)$$

为了获得高质量的圆柱形小孔,必须这样的来选择工艺参数 $(E, \Delta F, F, n)$;使差值 Δd 最小,同时还必须考虑到其它一系列的限制条件,例如为了保证孔的表面质量,要求孔的表面粗糙度 R_z 小于允许数值 $[R_z]$ 。而孔的表面粗糙度又决定于工艺参数 E 和 n (当 τ 值不变时)即 $R_z = f(E, n) = CE^{k_1}n^{k_2}$,其中 C 为系数, k_1, k_2 为幂指数,它们均由试验确定;另外,所选择的工艺参数 $(E, \Delta F, F, n)$ 不应超出数学模型(8)的因素空间范围之外(见表1),即要求 $E_H \leq E \leq E_B$, $F_H \leq F \leq F_B$, $\Delta F_H \leq \Delta F \leq \Delta F_B$, $n_H \leq n \leq n_B$,其中 H 表示下水平, B 表示上水平;由于各种原因,例如工具(激光射线)的不稳定,工艺方法(聚焦,设备用量的调整等)的不稳定,毛坯尺寸和性能的变动等所引起的工艺参数的变动量 $\delta E, \delta F, \delta \Delta F, \delta n$ 也应该小于允许数值 $[\delta E], [\delta F], [\delta \Delta F], [\delta n]$;加工过程中激光系统光学元件的发热,会恶化加工过程,造成加工过程的不稳定和降低加工质量,因此它们的发热温度 $T = T(E, \Delta F, F, n)$ (当 τ 不变时)应小于允许数值 $[T]$ 所得到的孔径还应位于所要求尺寸的范围,即 $d_{min} \leq d \leq d_{max}$,其中 d_{min}, d_{max} 相应地为所要求孔的最小和最大直径。因此,优化的问题就在于取直径差 Δd (关系式(8))作为获得圆柱孔的目标函数,上述的限制作为约束条件,从而可得按孔形要求而优化激光尺寸加工过程的数学模型。

在下列约束条件下

$$\begin{cases}
 [R_z] - R_{\max}(E, n) \geq 0 \\
 [T] - T(E, \Delta F, F, n) \geq 0 \\
 E - E_H \geq 0 \\
 E_B - E \geq 0 \\
 [\delta E] - \delta E \geq 0 \\
 F - F_H \geq 0 \\
 F_B - F \geq 0 \\
 [\delta F] - \delta F \geq 0 \\
 \Delta F - \Delta F_H \geq 0 \\
 \Delta F_B - \Delta F \geq 0 \\
 [\delta \Delta F] - \delta \Delta F \geq 0 \\
 n - n_H \geq 0 \\
 n_B - n \geq 0 \\
 [\delta_n] - n \geq 0 \\
 d(E, F, \Delta F, n) - d_{\min} \geq 0 \\
 d_{\max} - d(E, F, \Delta F, n) \geq 0
 \end{cases} \quad (9)$$

求解最优解 $E_n, F_n, \Delta F_n, n_n$, 使目标函数 $\Delta d = f(E, F, \Delta F, n)$ 取最小值 $\Delta d = f(E_n, F_n, \Delta F_n, n_n)$ 。

由于上述目标函数和某些约束条件是非线性函数, 所以这是非线性规划的优化问题, 它的一般形式是:

在约束条件:

$g_j(x_1, \dots, x_n) \geq 0 (j = 1, \dots, m)$ 之下, 求最优解 (x_1, \dots, x_n) , 使目标函数 $f(x_1, \dots, x_n)$ 达到最小值 $(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)$ 。或者简写成

$$\begin{cases}
 \min f(x_1, \dots, x_n) \\
 g_j(x_1, \dots, x_n) \geq 0 (j = 1, \dots, m)
 \end{cases} \quad (10)$$

对于这类非线性规划问题, 在电子计算机上已研究有通用的计算方法与程序, 是很容易求解的。关于求解的方法与技巧, 这里都不讨论了。这种优化方法比较复杂、要求采用较大容量的电子计算机, 尤其是在约束条件较多的情况下。它的另一个重大缺点是程序比较抽象, 并脱离具体的加工条件, 即所谓的脱机优化。因此, 即使数学模型相当符合加工过程 (实际上很难做到这一点)。并有足够的约束条件, 但由于加工条件随机变化的影响, 这种方法也不可能精确的反映真实的加工过程。即工艺参数的优化是静态的, 相对的和有条件的。因此这种优化方法并不是经常合理的。

下面介绍一种简单并能取得较好结果的优化方法, 它只需采用一只可编程的小型电子计算器就行了。

从关系式(1)和(2)可得

$$\begin{aligned}
 \Delta d = d_r - d_c = d_r - 0.219 - 0.051x_1 - 0.053x_2 - 0.04x_4 \\
 - 0.018x_2x_4 + 0.039x_4^2 + 0.03x_2^2
 \end{aligned} \quad (11)$$

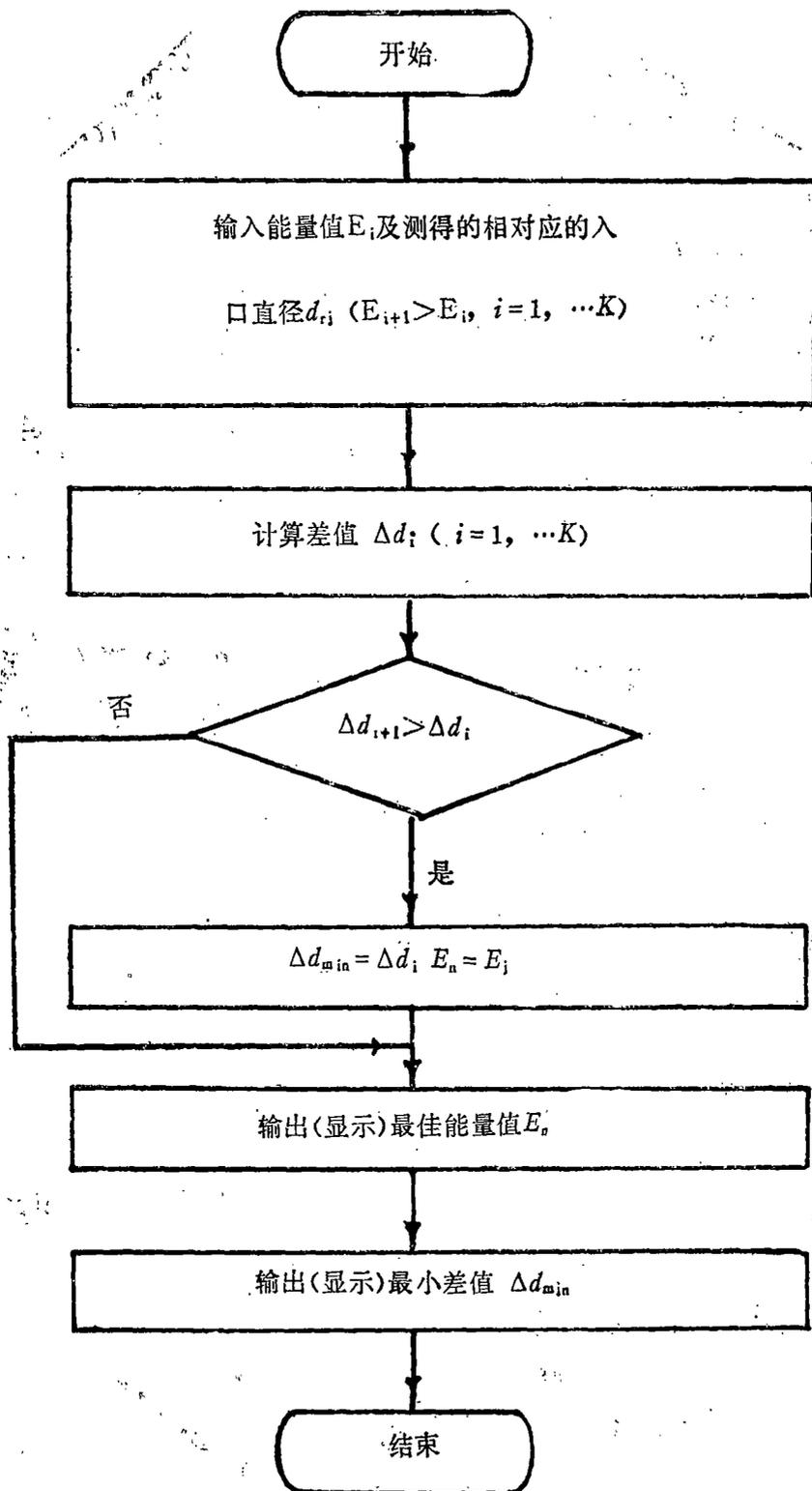


图 4

再利用关系式(3), 可得用实际因素表示的关系式

$$\Delta d = d_r - 0.0362 - 0.02E - 0.0033F - 0.059n - 0.000045Fn + 0.000075F^2 + 0.00975n^2 \quad (12)$$

下面, 我们把参数 F , ΔF 和 n 固定在一定的水平上, 以寻求获得圆柱孔的最佳能量值 E_0 为例, 来说明这种优化方法的原理。

这种优化方法的原理和程序如下: 首先向电子计算器输入一个按公式(12)计算差值 Δd 的程序, 然后在生产现场按所选择的原始能量值 E_1 进行加工, 加工后测量出相应的入口直径 d_{r1} , 把所测得的数据 d_{r1} 和 E_1 输入电子计算器, 并计算出对应于该种加工情况下的差值 Δd_1 。然后再选择另一个能量值 E_2 进行加工(例如设 E 在数学模型(12)的因素空间范围内, 由最小值向最大值方向变化, 即 $E_2 > E_1$), 又测量出该条件下所加工出的入口直径 d_{r2} , 再把 d_{r2} 和相应的 E_2 输入计算器, 它又自动计算出差值 Δd_2 , 并把 Δd_2 与 Δd_1 相比较。如果 $\Delta d_1 > \Delta d_2$, 即 $\Delta d_1 - \Delta d_2 > 0$, 这表示第一次的差值 Δd_1 比第二次的差值 Δd_2 大。因此计算器就显示出能量 E_2 , 这表示只有继续提高能量 E , 才能逼近最小差值 Δd_{\min} , 上述的过程再继续进行, 一直到取得 $\Delta d_{i+1} > \Delta d_i$, 此时计算器显示 E_i 。这就表示求得了获得最小差值 Δd_{\min} 的最佳能量值 $E_0 = E_i$ 。一般上述过程经过3~5次重复, 就能找到最佳能量值 E_0 。

这种优化方法的程序框图如图4所示。

按类似的方法也可求得最佳的其它参数 F_0 , ΔF_0 和 n_0 。这种优化方法是在工作现场靠试验, 测试和控制加工参数而实现的, 特别考虑到了操作者这一人为因素, 即操作者起着自适应系统传感器和激光工艺设备与电子计算机之间“接口”的作用。尤其当加工过程中存在大量的偶然因素及其误差, 它们的相互作用又大大影响工艺参数和加工过程时, 这种优化方法更显示出它的优越性和富有成效。同时, 这种优化方法还有一个很大的优点, 就是它所采用的反映加工过程规律的数学模型, 例如关系式(12), 并不要求数量上特别精确, 而只要定性的能估价目标函数与控制因素之间相互的规律性就行, 因此这种试验优化法不但简单, 而且具有很大的通用性和柔性。

Drill Material of Pottery by Pulsed Lasers and way of Optimisation of Manufacturing Parameters

Li Ruxun

Abstract

Mathematical model of pottery drilling by pulsed laser beam is established. The law of pottery drilling by pulsed lasers and way of optimisation of manufacturing parameters are analysed.

Subjectwords: Principles of manufacture; Experimental plan; Mathematical model; Way of optimisation