

# 深孔激光加工研究

李又生

(华中理工大学激光技术与工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 研究了深孔形成的物理过程, 提出了一种新型的深孔加工的激光脉冲波形, 用光锥方程和能量平衡关系式推导出孔深、孔径及有关激光参数, 与实验结果基本相符。

关键词: 激光打孔 峰值功率 脉冲形状

## Study on laser deep-hole drilling

Li Yousheng

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** Now the laser drilling is a useful technique in industry products. A very important problem is how to obtain the high quality deep-hole drilling. Starting from the selection of laser parameters and the instantaneous energy balance in the gasification and melting process, the engineering design of deep-hole drilling was presented, in this paper, and pointed the selection of ratio of depth and diameter, the design of the laser pulse shape. The calculation results are close to the experimental data.

**Key words:** laser drilling peak power pulse shape

### 引 言

通过把激光束聚焦在金属上使其气化, 可进行打孔加工。激光几乎可对所有材料打孔, 而要得到精度一致的加工孔是不容易的, 因为激光参数、材料性质等因素稍有变化均将影响打孔的质量。而难度最大的还是深孔的激光加工。所谓深孔即深径比很大的孔。目前尚未看到有关深孔的确切定义, 我们认为深度比直径大数倍以上的孔, 即可认为是深孔。深孔的形成是由加热、气化、熔化和孔壁的破坏等许多因素决定的, 涉及到蒸汽的凝聚、飞溅物流束与孔壁之

- 4 Klans B, Eckhard B, Rolf S. Laser welding of aluminum. 同 3: 249~ 258
- 5 Moon D W, Metz Bower E A. Welding Journal, 1983; 62(2): 53S~ 58S
- 6 Calder N, Whitaker I, Mecartney D *et al.* Laser welding of aluminum lithium alloy 8090. 同 1: 565~ 573
- 7 Blake A, Mazumder J. Transaction of the ASME Journal of Engineering for Industry, 1985; 107(3): 275~ 281
- 8 Huntington C A, Eagar T W. Welding Journal, 1983; 62(4): 105S~ 107S
- 9 Ki M J S, Watanabe T, Yoshida Y. Improvement of laser beam welding quality of aluminum alloys. Proceedings ICALEO'93 Laser Materials Processing, Florida USA, 1993, USA: Laser Institute of America, 1994: 640~ 650
- 10 Cieslak M J, Fuerschbach. Metallurgical Transactions B, 1988; 19B(2): 319~ 329
- 11 Gopinathan S, Murthy J, McCay T D *et al.* The autogenous laser welding of Al 2219 to Al 6061. 同 9: 794~ 804
- 12 Eberle H G, Richter K, Schobbert H. Welding of aluminum alloys with modulated lasers. Proc SPIE 2207, Laser Materials Processing: Industrial and Microelectronics Applications, Vienna, Austria, 1994, USA: The International Society for Optical Engineering(SPIE), 1994: 185~ 191

作者简介: 骆红, 女, 1966年12月出生。硕士, 讲师。现从事激光焊接质量监控及熔池模拟方面的研究工作。

间的辐射热交换和对流热交换,对散焦的激光辐射功率产生吸收等过程,使动力学问题相应地复杂了起来。

我们对深孔形成的物理过程进行了分析,用表示孔深孔径变化关系的光锥方程和准稳定条件下能量平衡的关系式,得出孔深和孔径的表达式。根据蒸发阵面上的功率平衡方程式,推导出加工深孔所需选取的有关激光参数,我们认为实现深孔加工的最有效的途径是多脉冲打孔方法。对单脉冲打孔,提出了一种新型的深孔加工的激光脉冲波形。

## 一、一般性理论

### 1. 孔深与孔径的关系

在脉冲激光辐射作用下,当激光功率密度达到某一值时,在一定的时间间隔内,金属表面将达到沸腾温度,并开始强烈地气化。热波和气化波将向金属深处传播。蒸发阵面处的能量平衡是用蒸发热以及轴向和径向热传导来表征的。所形成的孔壁由于正在蒸发的材料的影响而在作用持续时间内保持在蒸发温度上。轴向和径向热传导形成了一个熔融层,孔底蒸发时所形成的反冲脉冲将此熔融层沿着孔壁排出。为此,必须有足够的蒸发速率。相应的激光功率密度范围为<sup>[1]</sup>:  $I_a = 10^7 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ 。强度太小时,由于热传导,能量损耗变大,热波的速度显著地高于气化波的速度,所产生的液体排不出去或不能完全排除出去。强度太高时,入射的光束会被产生的金属蒸气吸收,从而使蒸气过热,并把热量和压力冲击传到周围材料中去。只有在辐射强度适当时,气化速度可与加热的速度相等,才出现最佳的能量传输和加工质量。

在孔增大的过程中,其半径  $r(t)$  的变化和它的深度  $h(t)$  的关系可用光学系统焦平面以后光锥的发散角为  $2\theta$  的光锥方程来表示:

$$r(t) = r_f + h(t) \operatorname{tg} \theta \quad (1)$$

式中,  $r_f$  为聚焦激光光斑半径。

在气化和熔化过程的准稳定条件下,凹坑中每一瞬时的能量平衡由下列表达式确定:

$$P_a(t) dt = L_v \pi r^2(t) dh + L_s 2\pi r(t) h(t) dr \quad (2)$$

式中:  $L_v$  为材料单位蒸发能量 ( $\text{J/cm}^3$ ),  $L_s$  为材料单位熔化能量 ( $\text{J/cm}^3$ ),  $P_a$  为材料吸收的辐射功率 ( $\text{W}$ ),  $t$  为辐射作用时间 ( $\text{s}$ )。

当打深孔时,可以认为  $h(t) \gg r_f$ ,  $t = 0$  时,  $r(0) = r_f = d_f/2$ ,  $d_f$  为金属表面上的聚焦激光光斑直径,则由(1)和(2)式得:

$$h(t) = \{(3P_a t) / [\pi \operatorname{tg}^2 \theta (L_v + 2L_s)]\}^{1/3} \quad (3)$$

$$r(t) = h(t) \operatorname{tg} \theta = \{(3P_a t \cdot \operatorname{tg} \theta) / [\pi (L_v + 2L_s)]\}^{1/3} \quad (4)$$

由公式(3),(4)可知,当  $h \gg r_f$  时,  $h$  和  $r$  与  $E^{1/3}$  成比例地变化,  $E = Pt$  为激光脉冲的全部能量。激光开始作用时,形成凹坑的直径改变得不明显,而由于材料在整个光斑面积内气化的结果,深度呈线性地增加。经过一定时间后,由于坑壁强烈地熔化和熔融物抛出及冲刷的结果,随着凹坑直径的增加,在深度方向上的增长速度变慢。在极限情况下 ( $t \rightarrow \infty$ )  $h$  和  $r$  与  $t^{1/3}$  成比例增加。

### 2. 有关激光参数分析

如果激光强度调整合适,熔融层一开始就能被排除出去。那么打孔速度就可以加快,等于熔融层的轴向形成速度。又假设形成的材料蒸气对入射光近乎透明,那么蒸发阵面上的功率平衡方程对很小液体排出时间  $t \ll r^2/\alpha$  来说则有<sup>[2]</sup>:

$$I_a = L_v [dh(t)/dt + (KT_v)/2 \pi(\alpha t) \cdot [1 + 2h(t)/r]] \quad (5)$$

式中,  $I_a$  为材料表面吸收的辐射强度 ( $W/cm^2$ ),  $T_v$  为蒸发温度 (K),  $K$  为导热率 ( $W/cm \cdot K$ ),  $\alpha$  为温度传导率 ( $cm^2/s$ ),  $r$  为孔的半径 (cm),  $h$  为孔的深度 (cm),  $t$  为时间 (s)。

根据方程 (5) 我们可求出打孔速度中蒸发效应的贡献为:  $(dh/dt)_v = I_a/L_v - [(KT_v)/(2L_v) \pi(\alpha)(1 + 2h/r)]$ ; 熔化效应对打孔的贡献(当熔融温度等于蒸发温度一半时)为  $0.35 \alpha/t$ , 所以整个打孔速度是两者之和:

$$dh/dt = I_a/L_v - \{(KT_v)/(2L_v) \pi(\alpha t)[1 + (2h)/r]\} + 0.35 \alpha/t \quad (6)$$

对大多数金属来说  $L_v/T_v c\rho \approx 5$ , 又  $\alpha = K/c\rho$  ( $c$  为材料比热:  $J/g \cdot K$ ;  $\rho$  为材料密度:  $g/cm^3$ ), 故可得打孔速度等于:  $dh/dt = L_a/L_v - \{0.17 \alpha/t[1 - (2h)/r]\}$  (7)

$$\text{如果熔融温度为蒸发温度的一半, 则孔径值大约为: } d = d_f + 0.7 \alpha/t \quad (8)$$

式中,  $d_f$  为试件表面上的光束直径。根据上述关系式, 可估算出加工  $h$  和  $d$  的孔所需要的试件吸收强度  $I_a$ 、能量  $E_a$  和脉冲持续时间  $\tau$  分别为:

$$I_a = [(L_v h)/\tau] \cdot (d - 0.7 \alpha t)/(d - 1.2 \alpha t) \quad (9)$$

$$E_a = (\pi/4) I_a \tau d_f^2 \quad (10)$$

$$\tau = (L_v/I_a) h \quad (11)$$

实际上激光强度应随孔深的增加而增加, 这样才能有效地去除材料, 使之不在孔壁上凝结, 还可进一步选用更加适中的参数:  $I_a = 5.5hL_v\alpha/d^2$ ,  $E_a = 0.5hL_v d^2$ ,  $\tau = 0.33d^2/\alpha$ ,  $d_f = 0.6d$ 。

### 3. 激光脉宽与孔深的关系

在研究形成深孔的模型时, 通常假定全部熔化物在过剩的压力作用下从凹坑内被排出。实际上仍有相当一部分熔化物残留在孔内, 并在脉冲的作用结束之后结晶在孔壁和底部。这是因为随着孔深的增加, 在其底部由于激光束散焦, 飞溅物对激光辐射的吸收, 在激光脉冲末端功率减小等原因而使激光功率密度降低。这导致气化速度和孔内蒸气压力下降, 其结果, 形成的熔化物中只有部分被排出。当脉冲宽度  $\tau \geq 1ms$  时, 甚至可能使孔堵塞。减少脉冲宽度, 使功率密度达到或超过  $5 \times 10^7 W/cm^2$ , 才可以获得在孔内没有被液态熔化物堵塞的孔。特别在打深孔时, 入射光束通过孔壁多次反射集中到孔的尖端, 有利于那里的材料去除<sup>[3]</sup>。为了实现深孔加工, 当脉冲能量基本恒定时, 孔深和直径与脉冲宽度有明显的依赖关系。脉宽在一定范围的增加, 孔深增加, 而孔径有所减少。由下表实验数据可知, 脉冲宽度从 0.25ms 增加到 0.85ms, 孔的深度增加了 50%, 与此同时, 直径减少了约 30% (材料 45 号钢, 焦距 35mm)。

Table Experimental data

energy (J)	pulse width (ms)	power density ( $W/cm^2$ )	depth of hole (mm)	diameter of hole (mm)	depth diameter ratio
5.4	0.25	$2.2 \times 10^8$	1.2	0.42	2.9
5.1	0.35	$1.5 \times 10^8$	1.3	0.39	3.3
5.9	0.55	$1.1 \times 10^8$	1.5	0.38	3.9
5.7	0.75	$7.6 \times 10^7$	1.6	0.36	4.4
5.4	0.85	$6.3 \times 10^7$	1.8	0.30	6.0
5.0	1.15	$4.4 \times 10^7$	1.6	0.26	6.1

## 二、深孔加工的工程设计

上述理论分析只是在一定程度上给出深孔加工的有关参数及取值范围,要获得高精度的深孔加工,从工程角度还要作许多设计方面的考虑,下面仅就部分有关问题作一简单的论述。

### 1. 多脉冲打孔方法的选用

用激光进行打孔加工,由于所发生的物理过程非常复杂且难于控制:如当飞溅物流动时孔道的形成;当激光脉冲的作用快要结束及结束以后孔壁上液体金属的重新分布和运动;随着孔的加深,激光功率密度分布的变化过程等。控制单一脉冲进行深孔加工以保证一定的精度和重复性是很困难的。用多脉冲加工是减少这些难于控制的因素最有效的途径。这时,由于每个脉冲使材料分层气化的结果,孔的深度逐渐增加。孔的最终深度由一组脉冲的总能量来决定。孔的直径则由一组脉冲里的单个激光脉冲的综合参数来决定。用能量为  $E/n$  的  $n$  个激光脉冲代替能量为  $E$  的一个打孔激光脉冲,并且激光器的不稳定性相同,那么可导致孔尺寸的均方根偏差随着  $n$  的增大而减小到  $1/\sqrt{n}$ 。最终尺寸的计算可按公式(1)和(2)进行,区别在于,现在的孔深  $h$  由一组脉冲总能量  $E = \sum_{i=1}^n E_i$  确定,孔径  $d$  由一组脉冲的平均能量  $E = (1/n) \sum_{i=1}^n E_i$  确定。深孔加工时,  $h > d$ , 孔的相对深度由下面的公式确定:

$$h/d = 1/(2 \operatorname{tg} \theta) \cdot n^{1/3}$$

因而,与一个脉冲加工的方法相比,采用多脉冲加工可以使孔的相对深度增加到  $n^{1/3}$  倍。

### 2. 新型激光打孔脉冲波形的设计

为了获得较好的深孔加工,通常所用的方波激光脉冲或者前尖后方的脉冲波形都不能很好满足要求。我们认为,较好的脉冲波形应该是前后沿尖而窄、中间光强递增。为方便工程设计,便于实现,也可是两头尖而窄、中间阶梯递增,如图 1 所示。

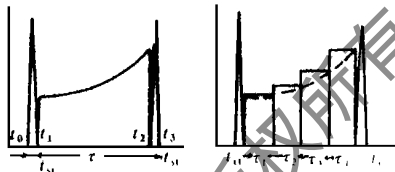


Fig. 1 Laser pulse shape

因为考虑到金属对激光辐射反射很强烈,而许多非金属对激光辐射的吸收又较弱,所以必须提高激光脉冲起始段( $t_0 t_1$ )的峰值强度,以克服材料反射的影响。脉冲前沿部分的脉宽( $t_0 t_1$ )取决于材料加热到气化温度所需的时间。 $t_1$ 以后,就在很大程度上不再依赖激光的波长和材料的表面状态了。在作深孔加工时,考虑到由于散焦和孔壁对激光辐射的吸收而引起的能量损耗,为了获得比较恒定的气化速度,在加工脉冲宽度时间内输入功率应有所增加,故波形的中间段( $t_1 t_2$ )应是递增的。激光辐射脉冲的后沿部分的峰值强度应提高且脉宽( $t_2 t_3$ )很短,在打深孔时,能使气化过程急速中断,以尽量减少液相形成和重新分布使孔堵塞的几率。为了获得所需的上述脉冲,可以在闪光灯电源里采用  $n$  个充电-放电回路,并把这些回路充以不同的电压,根据加工区所需要的输入功率逐次接通闪光灯的放电回路即可。

如图 2 所示,交流电压经过整流、滤波电路变成含有一定脉动电压成分的直流电压,进入高频变换器,产生高频高压方波,送给高频隔离变压器的初级,变压器次级感应出的电压(多路)经整流滤波后,获得所需要的不同幅值的多种直流电压。脉冲宽度调制(PWM)或脉冲频率调制(PFM),是通过对输出电压采样,并把采样结果反馈给控制电路,与基准电压比较以控制高频变换器中高频功率开关元件的开关时间比例(占空比)或频率的高低,以达到稳定输出

电压的目的。输辅电路主要包括过流、过压保护电路,使整个电路安全可靠地工作。输出及充电控制电路,将不同的电压( $V_{st}$ ,  $V_1, V_2, V_3, V_4$  和  $V_{et}$ ) 接至对应的储能电容器 ( $C_{st}, C_1, C_2, C_3, C_4$  和  $C_{et}$ ), 并对其充电。当触发、预燃电路已使脉冲氙灯 (FL) 维持预燃后, 即可启动触发脉冲延迟电路, 顺序给出触发信号 ( $T_{st}, T_1, T_2, T_3, T_4$  和  $T_{et}$ ), 使对应的可控硅 (SCR<sub>st</sub>, SCR<sub>1</sub>, SCR<sub>2</sub>, SCR<sub>3</sub>, SCR<sub>4</sub> 和 SCR<sub>et</sub>) 顺序导通, 储能电容顺序对脉冲氙灯放电, 即可得到所需要的激光脉冲波形。接着输出及充电控制电路又对储能电容充电, 按打孔所需的节拍, 触发脉冲延迟电路第二次工作, 激光器给出第二个打孔激光脉冲, 如此重复工作下去。电路中不同的电压值, 电容和电感值, 根据所选用的脉冲氙灯的参数、YAG 激光棒的参数、激光器的电光转换效率以及打孔加工的各个阶段所需注入的能量而定。

### 3. 辅助手段的采用

打孔时, 可在工件的正面施加一个正向压力, 例如用喷气方法, 或是在工件的反面加装一个低压舱, 对工件施以负压, 均有利于清除气化物质和飞溅物。喷气方法还可改善金属蒸气对聚焦透镜的污染。

为获得高精度的孔, 激光打孔后, 可采用机械修磨精加工的方法; 或是用化学腐蚀的附加方法进行精加工, 通常用酸溶液消除孔内的金属熔化物 and 毛刺, 以提高孔的圆度和光洁度。

## 三、结 论

对不同的材料, 根据深径比的要求, 设计研究合理的激光参数, 得到很好的光束质量, 这是最基础的工作, 只有再配置优良的激光聚焦系统, 脉冲次数合适的多脉冲加工系统以及与其适应的精密的焦距微调控制系统, 可望得到孔深和孔径之比达到几十的激光深孔加工。

### 参 考 文 献

- 1 Allmen A V. J A P, 1976; 47(12): 5460
- 2 Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of heat in solids. New York: Oxford Univ Press, 1954
- 3 M ax A. Einfluß des " Self-Channeling der laserstrahlung auf die intensita tsverteilung an bohrlochwandungen laser 77. Opto-Electronics IPC Science and T echnology Press, 1977: 267

作者简介: 李又生, 男, 1939 年出生。副教授。长期从事激光技术及其应用的研究。

收稿日期: 1997-08-05

请向邮局订阅 1998 年度《激光技术》

国内刊号: CN51- 1125/ TN, 邮发代号: 62- 74

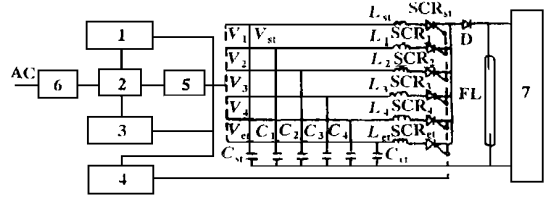


Fig. 2 Schematic diagram of laser power

- 1—auxiliary circuit
- 2—high frequency converter
- 3—PWM/PFM controlling circuit
- 4—trigger delay circuit
- 5—output and charging control
- 6—rectifier and filter
- 7—trigger and simmer circuit