

虚共心腔变能量打孔的研究

孙 堃 宋克良 包善斐

(吉林工业大学)

李维君 刘少奎

(吉林柴油机厂)

提要: 目前,对于多脉冲激光打孔,往往都是采用平行平面腔而脉冲能量采用平均分配法。我们认为这对打孔的精度,表面质量及其重复性来讲是不太有利的。通过对谐振腔型的输出特性以及对脉冲能量的合理分配所进行的分析与实验表明,采用虚共心腔变能量打孔,孔的精度、表面质量及其重复性是可以得到改善的,特别是在降低打孔的锥度方面有一定突破。

Investigation of drilling with false concentric resonator of changeable energy

Sun Kun Song Keliang Bao Shanfei

(Jilin University of Technology)

Li Weijun Liu Shokui

(Jilin Diesel Engine Factory)

Abstract: At present, plane parallel resonator is often used in multipulse laser drilling with average distribution of pulse energy. We consider it is disadvantageous in regard to accuracy, surface finishing and reproducibility for the drilled holes. Through analysis and experiments on output characteristics of resonators as well as rational distribution of pulse energy, improvement in accuracy, surface finishing and reproducibility of the drilled holes can be achieved, especially in improving their taper, by using false concentric resonator with changeable energy.

一、引 言

采用固体脉冲激光器来打宝石轴承孔、拉丝模孔等常需进行二次加工的小孔,现已成功地应用于生产实际。但是,对于那些技术要求较高而又不经过二次加工的较深的小

孔,目前采用激光打孔还普遍存在着精度(尺寸精度和几何形状精度)、表面质量(如表面光洁度)及其重复性(可用不稳定度来评定)还不够理想的问题。

下面,仅就目前所采用的腔型及多脉冲打孔所存在的问题进行分析,以期找到

收稿日期:1980年10月20日。

一种简易可行的办法,使打孔的精度、表面质量及其重复性能有较大幅度的提高。

二、虚共心腔的输出特性

要用激光经聚焦后打出精度、表面质量及其重复性都符合要求的孔,这就要求谐振腔输出的发散角要小,能量密度要高,场图要均匀的基模激光束,且腔内热形变及弥散要尽可能地小。因此,一个很重要的问题就是采用什么样的谐振腔可以满足上述这些要求。

对于打孔来说,选择稳定腔是不好的。选择介稳腔来满足打孔要求则是适宜的。平行平面腔与虚共心腔同属于介稳腔,但在工作物质、实际腔长等相同的条件下,它们的输出特性仍有较大的差异。

由于虚共心腔的波型损耗率相对差异比平行平面腔大 R_1/R_2 倍 (R_1 和 R_2 分别为半反射镜与全反射镜的曲率半径,且 $R_1 > R_2$),即前者的波型限制能力要比后者大 R_1/R_2 倍,或者说虚共心腔内的弥散要比平行平面腔为小^[1,2]。

此外,由于光泵和冷却不均等所引起的工作物质热畸变在棒的边缘区域要比中心区域严重得多。而虚共心腔传播的是锥状球面波,它基本上不通过棒的绝大部分边缘区域,因此,输出的球面波受到热畸变的影响较小;而在平行平面腔中,由于传播的是平面波,它通过工作物质的所有区域,故输出的平面波受到的畸变的影响就较大。

值得注意的是,一般在深微孔加工中,不但要有一定的输出能量(这一点虚共心腔是能够满足要求的),而且更重要的是形成孔深要有一定的能量密度。因为孔深的形成主要在于气化及爆震冲击作用;而不在于烧蚀熔化作用。设平行平面腔的输出能量和发散角分别为 E_1 和 θ_1 ,虚共心腔的分别为 E_2 和 θ_2 ,则两者的能量密度之比为

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{E_2 \theta_1^2}{E_1 \theta_2^2} \quad (1)$$

我们实验测得 $E_1 \approx 2E_2$, $\theta_1 \approx 4\theta_2$,所以 $W_2/W_1 \approx 8$,即虚共心腔的能量密度约为平行平面腔的 8 倍左右。

从上述分析对比可知,采用虚共心腔打孔将优越于平行平面腔打孔。

三、变能量打孔原理

文献[3]给出了孔深 h 和孔径 d 公式:

$$h = \left[\left(\frac{r_0}{\text{tg } \gamma} \right)^3 + \frac{3E}{\pi \text{tg}^2 \gamma L_0} \right]^{\frac{1}{3}} - \frac{r_0}{\text{tg } \gamma} \quad (2)$$

$$d = 2 \left[r_0^3 + \frac{3E \text{tg } \gamma}{\pi L_0} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

式中 r_0 ——最小焦斑半径; γ ——光锥半角; E ——脉冲能量; L_0 ——物质的气化潜热。

从上面两个公式可以看出,在 r_0 、 γ 及 L_0 一定时,孔深和孔径与 E 并不成直线关系。当 E 增加时,孔深虽然有所增加,但孔径也同时在增长。因而在一定孔径的要求下,孔深的增长便受到孔径增长的限制。因此,对于 $h/d > 5$ 的一些小孔,就常采用多脉冲打孔。

实验表明,当打孔的参数不变时采用多脉冲打孔,工件表面的孔径几乎不变,而延伸中间粗的部分增加孔深。但随着孔深的不断增加,这实际上就相当于焦斑半径在发生变化。由(3)式可知,这时孔径也会发生相应的变化。如果焦偏量为负,即焦点落入工件表面内部,则在多脉冲打孔时就会使孔出现细腰及鼓肚的“花瓶状”孔。如果焦偏量为正,即焦点位于工件表面上某一点时,头一个脉冲虽然可以形成较直的孔,但在多脉冲打孔时又会出现鼓肚现象。在最后一个脉冲时,由于焦斑半径的增大,激光的散射和材料的吸收作用,会使激光的功率密度逐渐降低,而又会使孔径变小,同时孔深出现饱和的趋势。

通过上述分析可以看出, 在多脉冲不变能量打孔中所出现的细腰及鼓肚现象, 这正是当前在多脉冲打孔中使孔的精度、表面质量及其重复性不够理想的主要表现之一。实际上, 问题还不止于此, 因为孔壁即使是比较光滑的曲面过渡, 也会使孔壁与孔底的液相成分在气化压力作用下的喷溅受到阻碍, 这就很有可能在较冷的孔壁上粘有液相金属的小颗粒, 使孔的表面光洁度降低, 甚至会使孔发生堵塞(见图 1)。



图 1

由此可见, 不论采用何种腔型, 脉冲“尖峰”是否调制, 只要采用不变能量的聚焦法打孔, 就都会出现上述问题。因此, 对打孔的参数进行变量控制, 以便尽量消除细腰或鼓肚现象, 提高孔的精度、表面质量及其重复性就有很重要的意义。

由式(3)可以看出, 在已知材料上打孔, 孔径 d 主要与 r_0 、 γ 及 E 有关。但对于一定的光斑直径及一定的透镜焦距而言, 在发散角不变的情况下, γ 及 r_0 也就定了。如果在 E 也不变的情况下使被加工表面永远置于最小焦斑处, 即每一个光脉冲后, 最小焦斑向材料内部前进一个距离以保持恒定的功率密度, 结果发现孔壁较直, 但锥度较大。同时这种方法还需要一套精密的自动控制系统而不便于实际应用。

但我们知道, 在工作中调节脉冲能量 E 算是最方便的了。因为脉冲能量可以很方便地通过调节储能电容充电电压的高低来控制。下面, 我们探讨在 r_0 、 γ 不变的情况下,

在多脉冲打孔时如何改变 E 以克服细腰及鼓肚现象。

图 2 表示三个光脉冲时当孔径不变而焦斑半径的变化情况。实验表明, 当工件表面离开焦点时(焦偏量 Δf 为正), 孔的轴向截形会变成抛物线形状。求解抛物线方程和光锥直线方程的交点即可得每个脉冲后的焦斑半径 $x_1, x_2, x_3 \dots$ 。

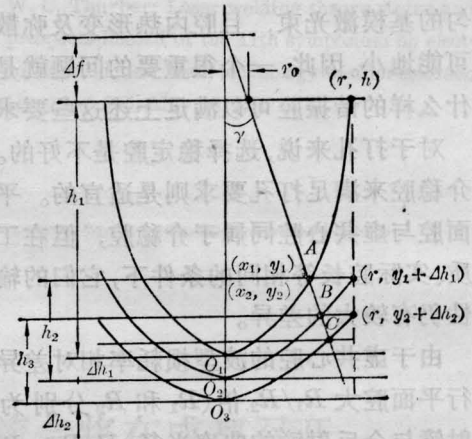


图 2

第一个脉冲后孔形曲线方程 $y = x^2/2p_1$ 和光锥直线方程 $y = kx + b_1$ 的交点 $A(x_1, y_1)$ 为

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= p_1 \left(k + \sqrt{k^2 + \frac{2b_1}{p_1}} \right) \\ y_1 &= kx_1 + b_1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 $p_1 = r^2/2h_1$, r ——孔的半径, h_1 ——第一个脉冲后按(2)式计算的孔深, $k = -1/\text{tg } \gamma$; $b_1 = h_1 + \Delta f = h_1 + r_0/\text{tg } \gamma$ 。

第二个脉冲后孔形曲线方程 $y = x^2/2p_2$ 和光锥直线方程 $y = kx + b_2$ 的交点 $B(x_2, y_2)$ 为

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= p_2 \left(k + \sqrt{k^2 + \frac{2b_2}{p_2}} \right) \\ y_2 &= kx_2 + b_2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $p_2 = r^2/2(y_1 + \Delta h_1) = r^2/2h_2$, $\Delta h_1 = h_2 - y_1$, h_2 ——第二个脉冲后按(2)式计算的孔深; $b_2 = h_1 + \Delta f + \Delta h_1$ 。依此类推便可求出交点 $C, D \dots$ 。由图 2 可知, $r_0 < x_1 < x_2 < x_3 < \dots$ 。

由于在多脉冲打孔中焦斑半径在发生变化, 因此, 为得到所要求的孔径 d , 每个脉冲的能量也就不能一样。根据(3)式便可导出每个脉冲的能量:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \left[\left(\frac{d}{2} \right)^3 - r_0^3 \right] \frac{\pi L_0}{3 \operatorname{tg} \gamma} \\ E_2 &= \left[\left(\frac{d}{2} \right)^3 - x_1^3 \right] \frac{\pi L_0}{3 \operatorname{tg} \gamma} \\ E_3 &= \left[\left(\frac{d}{2} \right)^3 - x_2^3 \right] \frac{\pi L_0}{3 \operatorname{tg} \gamma} \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由于 $r_0 < x_1 < x_2 < \dots$, 故 $E_1 > E_2 > E_3 \dots$ 。但应注意, 最后一个脉冲的功率密度不应低于 10^6 瓦/厘米², 以避免材料由于不能充分气化而使喷溅物中夹杂着大量的液相金属, 使孔的精度、表面质量及其重复性遭到破坏。这样, 通过激光转换效率就可将输出能量转化为储能电容的充电电压, 即工作电压值。

由于采用脉冲能量逐渐降低分配法, 可以预料到孔深的饱和要比采用不变能量法打孔时来得快, 即孔深的增长将要受到脉冲能量降低的限制。故 $\Delta h_1 > \Delta h_2 > \Delta h_3 > \dots$, 这时孔深将为

$$h = h_1 + \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \dots \quad (7)$$

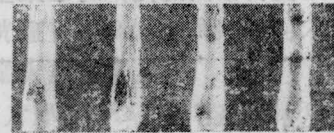
四、虚共心腔变能量打孔实验

现分别对 18CrNiWA 试片进行平行平

面腔与虚共心腔的变能量与不变能量打孔实验, 结果见表。从表可以清楚地看出, 在大致相同的工作电压下, 采用虚共心腔打孔各项评定指标都有所改善。但是采用虚共心腔变能量打孔时更为突出, 特别是在降低打孔的锥度方面有一定突破。两种腔型在第一个脉冲能量大致相同的情况下, 实验结果与表的规律大致相符。



平行平面腔不变能量打孔



平行平面腔变能量打孔



虚共心腔不变能量打孔



虚共心腔变能量打孔

图 3

打孔方式	锥 度	椭 圆 度	直 径 变 动	不 稳 定 度
平行平面腔不变能量 1.8, 1.8, 1.8 千伏	1.33(1)	0.060(1)	0.20(1)	82.3(1)
平行平面腔变能量 1.8, 1.7, 1.6 千伏	0.91(0.68)	0.062(1)	0.08(0.4)	63.4(0.77)
虚共心腔不变能量 1.8, 1.8, 1.8 千伏	0.56(0.42)	0.016(0.27)	0.06(0.3)	59.9(0.73)
虚共心腔变能量 1.8, 1.7, 1.6 千伏	0.15(0.11)	0.010(0.17)	0.11(0.55)	42.7(0.52)

注: 锥度 = (入口直径 - 出口直径) / 孔深
 椭圆度 = 两个垂直方向的孔径差(毫米)
 直径变动 = 孔口的最大最小孔径差(毫米)
 不稳定性 = 孔径变化的绝对值/孔径的平均值, (%)
 括号内的数字为相对比较值

孔壁的表面质量见图3。对于平行平面腔变能量打孔和不变能量打孔两者相差不大,这是由于脉冲能量较高,材料气化比较充分以及试片不太厚所致。但对于虚共心腔变能量打孔和不变能量打孔,两者的表面质量就相差较大。由于在相同的工作电压下(1800伏)虚共心腔的输出能量仅为平行平面腔的一半,故这时在不变能量打孔时孔截形的“花瓶状”就会使材料的熔化成分在气化压力下的喷溅受到阻碍,致使表面质量较差。但在变能量打孔时,由于孔壁较直,因而表面也较光滑。

另外还值得指出的是,对于某些非平板

零件,为防止激光打到孔的对面(如柴油机喷嘴),常采用非金属销子进行保护。当采用变能量打孔后,由于最后一个脉冲能量较低,故销子的寿命可大大提高,这在大批量生产中就减少了经常换销的麻烦,有助于进一步提高生产率。

参 考 文 献

- [1] 赫光生,雷仕湛;《激光器设计基础》,上海科学技术出版社,1979年。
- [2] 赫光生等;《激光》,1978,5, No. 2, 6。
- [3] Ф. Ф. Водоватов и др; Лазеры в технологии, ЭНЕРГИЯ, 1975年。

简 讯

第五届国际激光和光电子学会议

第五届国际激光光电子学会议暨国际激光光电子专业博览会于1981年6月1日至6月9日在慕尼黑召开。出席会议的有中国、美国、英国、法国、西德、苏联、瑞士、南斯拉夫、意大利、奥地利等十八个国家的代表。会议安排了147篇学术报告,其中中国9篇。会议对于下述内容置于显著地位,其中包括:光电子信号的传输——纤维光学信号传输的现状与展望;激光系统——可调谱红外激光光源;激光光谱和激光化学——激光在化学中的应用;宇宙和空间技术中的激光和光电子学;激光技术在测量和检验中的应用——用激光干涉术测量位移、速度和

振动;激光在材料加工中的应用——金属机件加工中高功率激光器的应用;光电子元件——光电子半导体器件的最新进展;医学中的激光和光电子学——光生物学中的喇曼光谱;测量和检验技术中的光电子学——测量中使用光电晶体;光电能的转换;光电显示;光电成象和数据处理;光电子电视接收。中国代表团由中国精密机械公司技术发展部经理言乃昌团长率领一行十六人参加学术会议和博览会,正在西德和法国作访问研究的我国科学工作者胡企铨、颜炳玉、王天及也作为代表出席了学术会议。

(王天及)