

激光脉冲超声调制打孔的研究

富崇大 孙 堃

李维君

(吉林工业大学)

(吉林柴油机厂)

提要: 分析了采用规则激光脉冲尖峰序列打孔的优点及脉冲尖峰参数的选择。对激光脉冲尖峰超声调制的一些规律及对打孔的影响进行了研究。实验和分析表明,采用超声调制打孔可较大地改善打孔的精度、表面质量及打孔的重复性。

Investigation on drilling by ultrasonic modulation of laser pulse spikes

Fu Chongda, Sun Kun

Li Weijun

(Jilin University of Technology) (Jilin Diesel Engine Factory)

Abstract: The advantages of using regular laser pulse spikes for drilling and the selection of pulse spike parameters are discussed. The regulation for ultrasonic modulation of laser pulse spikes and the influence of modulation on drilling are studied. The experiments and analyses have proved that ultrasonic modulation can improve greatly the accuracy, surface finishing and reproducibility.

一、引言

我们知道,激光波形的脉冲尖峰结构对打孔是特别有利的^[1]。由于弛豫振荡效应,固体脉冲激光器虽然也能够产生几十个乃至几百个具有尖峰结构的脉冲,但是它们都呈现出不规则的强度起伏,具有随机特性。另外,激光器在多模振荡时,由于它们的初始相位不同,各模式频率之间没有确定的关系,也造成不规则的脉冲尖峰振荡,输出的激光强度也是无规律地起伏着。

采用这种不规则的激光脉冲尖峰群来打孔是非常不利的,这种“乱雕乱刻”正是成孔

过程不稳定的重要因素之一。它使孔的精度、表面质量以及打孔的重复性难以提高。因此,研究如何控制激光脉冲尖峰结构,如何选择脉冲尖峰参数以及研究它们对打孔的影响具有十分重要的意义。

二、对激光脉冲尖峰序列的要求

当采用规则的激光脉冲尖峰序列打孔时,对激光脉冲尖峰参数有一定的要求^[1]:

1. 脉冲尖峰的前沿应较陡。因为材料加热到蒸发温度的时间首先取决于前沿的陡度。较平的前沿就会造成热作用区扩大,增

收稿日期:1981年2月28日。

加热量的损耗, 但过陡的前沿又会使蒸发过程来不及变成准稳定蒸发过程(即孔底仅为蒸发而孔壁仅为熔化)。因此, 脉冲尖峰的前沿 τ_q 最大不应超过热饱和和所需的时间, 最小不应低于加热到准稳定蒸发温度所需的时间。即:

$$\frac{\pi k^2 T_0^2}{4q_i^2 a} < \tau_q < 0.1 \frac{r_0^2}{a} \quad (1)$$

式中 k 为材料的导热率; a 为材料的导热性; T_0 为准稳定蒸发温度; q_i 为功率密度; r_0 为激光束焦斑半径, $r_0 = \frac{1}{2} f \theta$, f 为聚焦透镜的焦距; θ 为激光束的发散角。

2. 脉冲尖峰的后沿不应大于前沿, 以便在获得一定孔深时能够立即结束蒸发过程, 残留在孔底的液相及其再分布量就很少, 并可减少孔发生堵塞的现象。

3. 脉冲尖峰间的间隔应能保证在一个脉冲尖峰终了时能使材料冷凝到结晶温度, 并能使蒸发破坏产物排出体外, 以减少对激光的屏蔽作用。如果蒸气运动速度为 10^5 厘米/秒, 则脉冲尖峰间的间隔 τ_g 可按下式估算:

$$\tau_g \geq \frac{h}{10^5} \quad (2)$$

式中 h 为孔深。

4. 为了使每一个脉冲尖峰都能单独按准稳定蒸发过程蒸发材料, 每一个脉冲尖峰应具有功率密度 q_i 为:

$$q_i \geq L_0 \sqrt{\frac{a}{\tau}} \quad (3)$$

式中 L_0 为材料的蒸发潜热; τ 为激光脉冲尖峰的宽度。这时每个脉冲尖峰的平均辐射能量 E_i 是:

$$E_i \geq \pi r_0^2 q_i \tau \quad (4)$$

5. 为了保证在孔的形成过程中孔壁和孔底的液相最少, 要求在一个脉冲尖峰作用时间内蒸发的深度小于 $2r_0$ 。为了得到较多的脉冲数, 蒸发深度可按 r_0 估算, 则脉冲尖

峰的数目 n 应为:

$$n = \frac{h}{r_0} \quad (5)$$

6. 在一个脉冲尖峰作用时间内, 如蒸发孔径为 $2r$, 蒸发孔深为 r_0 , 则所需要的辐射能量 E_j 显然不应小于 E_i :

$$E_j = \pi r^2 r_0 L_p > E_i \quad (6)$$

式中 L_p 为材料的破坏比能。

7. 如果单个脉冲尖峰的辐射能量按 E_j 来考虑, 则总能量 E 为:

$$E = n E_j \quad (7)$$

8. 如果脉冲氙灯每闪一次可得 m 个激光脉冲尖峰序列, 则氙灯需闪 p 次:

$$p = \frac{n}{m} \quad (8)$$

9. 在 m 个脉冲尖峰时应具有的辐射能量为 E_m :

$$E_m = m E_j \quad (9)$$

10. 如果激光器的转换效率为 η , 储能电容为 C , 则可大致求出工作电压 V :

$$V = \left(\frac{2 E_m}{C \eta} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

以上各参量的计量单位见下例:

某材料

$$L_0 = 5 \times 10^4 \text{ 焦耳/厘米}^3,$$

$$L_p = 70 \times 10^3 \text{ 焦耳/厘米}^3,$$

$$a = 0.1 \text{ 厘米}^2/\text{秒},$$

$$T_0 = 5100 \text{ K},$$

$$k = 0.414 \text{ 瓦/厘米} \cdot \text{K},$$

$$2r = 0.025 \text{ 厘米},$$

$$h = 0.25 \text{ 厘米},$$

$$f = 5.1745 \text{ 厘米},$$

$$\eta = 0.5\%,$$

$$C = 1120 \text{ 微法},$$

则脉冲尖峰序列的各项参数计算结果见表 1。

表 1

θ (弧度)	r_0 (厘米)	τ_a (微秒)	τ (微秒)	τ_g (微秒)	q_s (瓦/厘米 ²)	E_s (焦耳)	E_j (焦耳)	n (个)	m (个)	p (次)	E (焦耳)	E_m (焦耳)	V (千伏)
0.001	0.003	1.4~9 (6)	(12)	3 (12)	0.5×10^7	0.002	0.10	83	(20)	4	8.3	2	0.85
0.004	0.010	1.4~100 (6)	(12)	3 (12)	0.5×10^7	0.020	0.34	25	(45)	1	8.5	15.3	2.3

注: 括号内数字根据调制后脉冲尖峰波形取值。

三、激光波形的超声调制

采用各种调Q或锁模技术可以获得规则的激光脉冲尖峰序列。但从实际应用观点出发,使谐振腔的全反射镜片作超声振动的调制方法最为简便。

下面为一组激光波形超声调制的实验结果。

1. 当采用超声调制时,钕玻璃激光波形由自由振荡状态的强度、随机起伏的脉冲尖峰群转变为规则的脉冲尖峰序列,如图1所示。

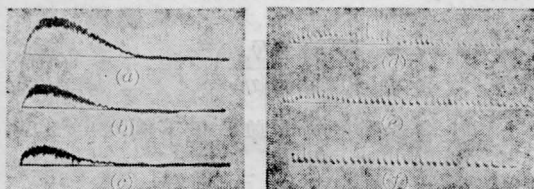


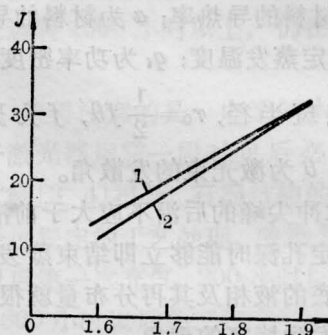
图 1

未调制: a) $V=1800$ 伏, b) $V=1600$ 伏, c) $V=1400$ 伏
调制: d) $V=1800$ 伏, 调制频率 $\omega=20950$ 赫, 振幅 $A=1.0$ 微米
e) $V=1600$ 伏, $\omega=20762$ 赫, $A=1.0$ 微米
f) $V=1400$ 伏, $\omega=20607$ 赫, $A=1.5$ 微米

由图1可以看出,随着工作电压 V 增加,调制后脉冲尖峰的数目 n 也增加,但尖峰宽度 τ 及其间隔 τ_g 基本保持不变。尖峰出现的频率大致为超声波调制频率 ω 的2倍。

2. 调制后激光器辐射能量比未调制时有所增加,但随着工作电压增加,能量的增加稍有降低(图2)。

调制后单个脉冲尖峰的平均辐射能量见



(千伏)

图 2

1—调制; 2—未调制
工作物质: 钕玻璃 $\phi 10 \times 210$

表 2

工作电压 V (伏)	1400	1600	1800
输出能量 E_m (焦耳)	4.4	7.6	10.6
尖峰数目 n (个)	26	43	45
尖峰能量 E_j (焦耳)	0.16	0.17	0.23

注: 工作物质: 钕玻璃 $\phi 6 \times 210$

表2。

3. 激光束的发散角在未调制时为5毫弧度,经调制后可减少到4毫弧度。当聚焦透镜的焦距 $f=5.1745$ 厘米时,调制后焦深范围距透镜的位置比未调制时远离0.5毫米左右。

4. 经调制后的场图比未经调制时的场图强度要高而且均匀。

从上述激光波形超声调制的结果可以看出,在打孔时(参照前面的计算示例表2)对激光脉冲尖峰序列的各项参数所提出的要求是可以满足的。

四、激光波形超声调制打孔

1. 铝片。厚度为 0.25 毫米, 在不同工作电压下打孔结果见表 3。

表 3

工作电压 (伏)	入口平均尺寸 (毫米)	
	调 制	未 调 制
800	0.27(全透)	0.30(全不透)
1000	0.37(全透)	0.41(全不透)

注: 1. 工作物质: 钽玻璃 $\phi 10 \times 210$, 加 $\phi 6$ 光阑
2. 氙灯闪光次数: $p=1$ 次/孔

从表 3 可以看出: 在同样工作电压下, 调制打孔孔径小于未调制打孔。因为经调制后打孔的孔径主要由单个脉冲尖峰的辐射能量 E_s 来决定, 而未经调制打孔的孔径主要是由输出能量 E_m 来决定。另外, 经调制后单个脉冲尖峰的辐射能量有所增强, 激光束的发散角有所减少。所以激光束调制后打孔较未调制打孔的穿透力强、圆柱度较小。

在工作电压为 1400 伏, 未加衬垫(有机玻璃)时进行调制及未调制打孔实验, 结果见表 4。可以看出, 经调制打孔后, 孔的各项精度指标及打孔的重复性均可得到提高。原因之一是由于规则的激光脉冲尖峰序列的各

表 4

打孔方式	入口平均尺寸 (毫米)	出口平均尺寸 (毫米)	圆 度 (毫米)	圆柱度 (毫米)	孔径最大变动量 (毫米)	入口孔径精度	入口孔径均方差	不稳定度 (%)
调 制	0.39	0.27	0.015	0.06	0.04	10	0.00963	10
未 调 制	0.41	0.25	0.02	0.08	0.07	11~12	0.01972	17

注: 1. 工作物质: 钽玻璃 $\phi 6 \times 210$, 未加光阑;
2. 氙灯闪光次数: $p=1$ 次/孔;
3. 不稳定度指入口孔径最大变动量与入口平均尺寸之比

表 5

打孔方式	入口平均尺寸 (毫米)	出口平均尺寸 (毫米)	圆 度 (毫米)	圆柱度 (毫米)	孔径最大变动量 (毫米)	入口孔径精度	入口孔径均方差	不稳定度 (%)
调 制	0.44	0.25	0.015	0.095	0.04	10	0.0113	9
未 调 制	0.49	0.23	0.025	0.13	0.07	11~12	0.0181	14

注: 1. 工作物质: 钽玻璃 $\phi 6 \times 210$, 未加光阑
2. 氙灯闪光次数: $p=3$ 次/孔

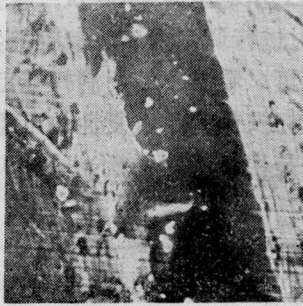
表 6

件 数	喷 油		尺 寸 分 组					废 品	成 品 率 (%)
	合 格	不 合 格	<I	I	II	III	>III		
50	50	0	0	0	50	0	0	0	100

注: 1. 工作物质: 钽玻璃 $\phi 6 \times 210$, 未加光阑
2. 氙灯闪光次数: $p=3$ 次/孔
3. 喷油不合格及尺寸分组为小于 I 或大于 III 均为废品

表 7

打 孔 方 式	钻 孔		电火花打孔		激光非调制打孔		激光调制打孔	
	未 磨	磨	未 磨	磨	未 磨	磨	未 磨	磨
入口尺寸 (毫米)	0.33	0.32	0.31	0.29	0.39	0.36	0.32	0.28
出口尺寸 (毫米)	0.32		0.25		0.25		0.25	
圆 柱 度 (毫米)	0.005	0	0.03	0.02	0.07	0.055	0.035	0.015
表面光洁度	▽ ₈		▽ ₅		▽ ₄		▽ ₁₀	



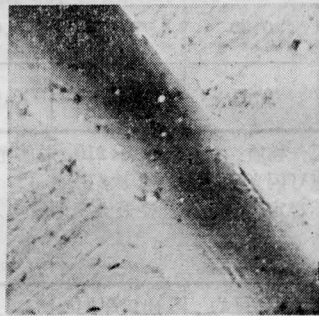
(a) 钻孔



(b) 电火花打孔



(c) 未调制打孔



(d) 调制打孔

图 3

项参数比较符合要求, 可使孔的形成过程稳定化; 另一方面, 在调制打孔时是把输出能量 E_m 的一个脉冲转化为能量为 $E_j = E_m/m$ 的 m 个脉冲, 因此, 在理论上可使孔径精度指标的均方差减少 \sqrt{m} 倍。

2. 18CrNiWA 试片。厚度为 2 毫米, 在工作电压为 1800 伏, 未加衬垫(有机玻璃)时进行调制及未调制打孔实验, 结果见表 5。可见, 所得结果仍符合前面实验所验证的一些规律。此外, 经调制后打孔的孔壁表面相当光洁(见图 3)。孔口堆积的喷溅物颗粒细小, 孔口边缘较清晰。

3. 喷油嘴。材料为 18CrNiWA, $\phi 0.25 \pm 0.02$, 7 孔均布, 孔深 2.3 毫米。在工作电压为 1800 伏, 加有机玻璃销(衬垫)时连续对 50 个喷油嘴进行调制打孔, 在工厂生产的条件下进行检测, 结果见表 6, 打孔的成品率达到 100%。这一实验结果充分表明, 采用调制打孔时孔的精度、表面质量及打孔的重复性均可得到较大幅度改善和提高。而在未调制打孔时, 成品率则很难达到 80% 以上, 即使是尺寸分组这一项全部合格(喷油不合格也算废品), 尺寸也较分散。曾对 50 个喷油嘴进行未调制连续打孔, 检测结果 I 组 11

个, II组 30个, III组 9个,

抽检喷嘴采用钻孔、电火花打孔、激光未调制打孔及激光调制打孔四个零件的圆柱度及孔壁的表面光洁度比较见表7。由于该零件孔口表面还要磨去0.10~0.15毫米,结果采用调制打孔圆柱度并不高于电火花打孔。从孔壁的表面质量来看,未调制打孔光洁度最差,而调制打孔时孔壁最为光洁(见图3)。

(上接第27页)

CO₂激光器(脉宽为0.3微秒)对膜层进行了抗激光强度实验,结果见图1~4。图1和图3是在不同基底上未镀保护膜的情形;图2和图4是在不同基底上镀了ThF₄保护膜的情形。从照片可以清楚地看出,在同一基底材料上镀保护膜和未镀保护膜的金膜,在同一功率密度的CO₂激光束作用下,遭到的破坏程度(面积大小、深度、状态)是完全不同的。

对多种高真空蒸镀的金膜和加镀ThF₄保护膜层后的金膜反射镜进行了反射率测量。镀保护膜后,反射率降低小于0.5%。在2.5~15微米波长范围内,吻合在1%,见图5。

(上接第29页)

M. R. T. Siregar 等人在控制硅片温度(78~850 K)的情况下测量了硅对CO₂激光的透射率,观察到600 K是透射率下降的突变点^[7]。本文的分析与Siregar等人的看法是一致的。G. K. Celler 等人^[4]在研究离子注入硅的连续CO₂激光退火时先将硅片预热到350°C左右,然后再受CO₂激光辐照。实验证明这样可以用较低的激光功率而收到更好的效果。从本文工作来看,样品预热除可减小辐照时的热应力外,一个重要的作用是由于热激发使自由载流子的浓度提高,从而大大增强硅对CO₂激光能量的吸收。Celler 等人选择的预热温度“350°C”与本文得到的600 K是很一致的。

从上述激光脉冲超声调制打孔的实验效果可以看出,对喷嘴上的微孔以及相类似的不需二次加工的微孔零件,采用激光打孔在工艺上就是可行的了。

参 考 文 献

- [1] Ф. Ф. 沃道互托夫等;《激光在工艺中的应用》,机械工业出版社,1980年。

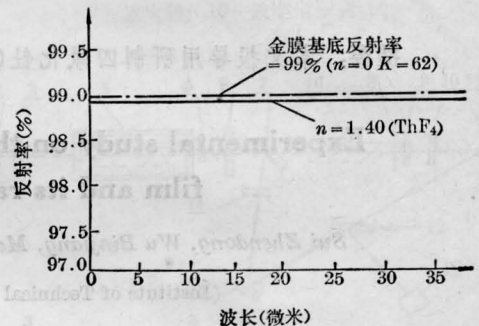


图5 反射率测量曲线

对镀制ThF₄保护膜后的镜片进行了放射性强度的测量,结果为 $1.4 \times 10^{-14} \sim 7.5 \times 10^{-14}$ 居里/厘米²,符合国家放射性卫生防护规定(GBJ-8-74),合乎安全使用标准。

本文经周光地先生审阅修改,工作期间曾与邹世昌先生进行过有益的讨论,并得到赵建荣、孙祉伟同志实验上的帮助,在此致谢。

参 考 文 献

- [1] H. F. Wolf; Silicon Semiconductor Data, 1969.
[2] L. Jastrzebski et al.; J. Electrochemical Soc., 1979, 126, No. 2, 260.
[3] M. Miyao et al.; Appl. Phys. Lett., 1979, 35, No. 3, 227.
[4] 李元恒;《北京光学》, 1981, 4, 38.
[5] Max Born et al.; Principles of Optics, 1975.
[6] 黄昆等;“半导体物理学”, 1958年。
[7] M. R. T. Siregar et al.; Appl. Phys. Lett., 1980, 36, No. 10, 787.