

图9表明,当激光入射功率固定时(均为1.5 W),在一定范围内镀点直径和厚度随光照时间增加而增强,但逐渐出现饱和现象。

(3) 镀液 pH 值的影响

镀液的 pH 值对铜的沉积速率影响较大。实验表明,当镀液中含 NaOH 约为 4.0 g/l 时,得到几乎无背景的镀点;但当 NaOH 含量小于 3.5 g/l 时,不出现激光增强效应。

作者对浙江大学光仪系陈钰清副教授的有益建议和薄膜光学研究室的帮助表示感谢。本系王逸凡

、李振华、陆茵、边少华、张德顺和王建设诸同志在实验中做了许多工作,作者一并致谢。

参 考 文 献

- [1] R. J. Von Gutfeld *et al.*, *IBM J. Res. Develop* 1982, **26**, 136.
- [2] R. J. Von Gutfeld *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1983 **43**, 876.
- [3] R. J. Von Gutfeld *et al.*; *Apl. Phys. Lett.*, 1979, **35**, 651.

(1986年5月29日收稿)

激光脉冲转盘调制打孔的研究

孙 堃 富崇大 孙秀男 胡秉文 夏 卿 董清泉

(吉林工业大学)

(吉林柴油机厂)

Investigation on laser pulse drilling with disc-rotor modulation

Sun Kun, Fu Chongda, Sun Xiunan, Hu Bingwen, Xia Qing

(Jilin University of Technology, Changchun)

Dong Qingquan

(Jilin Diesel Engine Factory, Changchun)

Abstract: Laser pulse width can be narrowed and pulse number and the interval can be controlled with disc-rotor modulation. Laser drilling by disc-rotor modulation can further improve the accuracy, surface finishing and stability.

本文报道在不改变原来激光电源的基础上,为了能够灵活地按需要控制激光脉宽、脉冲个数、脉冲间隔、脉冲的重复频率以及切去较缓的脉冲后沿,采用了激光脉冲转盘调制法。下面是一些主要结果。

1. 激光转盘调制打孔参数计算

当激光脉冲通过高速旋转的带有一定长度孔槽的圆盘时(图1),激光脉冲便可根据要求得到调制:

(1) 改变孔槽的长度,就可以改变激光的脉冲宽度,切去激光脉冲较缓的后沿,可以得到脉宽窄后沿陡的激光脉冲。

(2) 将孔槽进行分割,就可以得到一定数目、脉宽及间隔的子脉冲,从而改变子脉冲的重复频率。

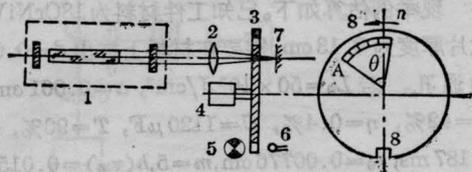


图 1

- 1—激光器; 2—聚焦透镜; 3—转盘; 4—电机;
- 5—灯泡; 6—光电管; 7—工件; 8—孔槽

激光脉冲宽度 τ 和转盘转速 n 之间有如下关系:

系:

$$\tau = \frac{\theta}{2\pi n} \quad (1)$$

式中 θ 为孔槽工作角度。孔槽始端 A 应与激光脉冲同步。

对于多脉冲精密打孔，要求一个脉冲去除材料的深度 $h(\tau_F)$ 和脉冲宽度 τ_F 应符合下式^[1]

$$h(\tau_F) \leq 2r_0 \quad (2)$$

$$\tau_F \leq \frac{r_0^2}{\alpha} \quad (3)$$

式中 r_0 ——焦斑半径； α ——材料的热扩散率。所需总的脉冲能量 E

$$E = \frac{\pi d^2}{4} h L_0 \quad (4)$$

式中 d ——要求的直径； h ——要求的孔深； L_0 ——材料的气化比能。

所需子脉冲个数 k

$$k = \frac{h}{h(\tau_F)} \quad (5)$$

故一个子脉冲的平均能量 \bar{E}

$$\bar{E} = \frac{E}{k} \quad (6)$$

如果脉冲氙灯每闪一次可得 m 个激光脉冲，则打完一个孔脉冲氙灯需闪 p 次

$$p = \frac{k}{m} \quad (7)$$

脉冲氙灯每闪一次应输出的脉冲能量 E_p

$$E_p = \frac{E}{p} \quad (8)$$

转换成激光电源储能电容充电的工作电压 U

$$U = \left(\frac{2E_p}{C\eta AT} \right)^{1/2} \quad (9)$$

式中 C ——储能电容量； η ——激光器的转换效率； A ——材料的吸收率； T ——保护透镜介质（玻璃纸）的透过率。

最后应验算一下功率密度，应使 $q > 10^7 \text{ W/cm}^2$

$$q = \frac{E}{\pi r_0^2 \tau_F} \quad (10)$$

现举例估算如下。已知工件材料为 18CrNiWA，试片厚度为 0.13 cm，需要在材料上打出 $d=0.03 \text{ cm}$ 的通孔。若 $L_0=50 \times 10^3 \text{ J/cm}^3$ ， $\alpha=0.061 \text{ cm}^2/\text{s}$ ， $A=42\%$ ， $\eta=0.4\%$ ， $C=1120 \mu\text{F}$ ， $T=90\%$ ， $\tau_F=0.187 \text{ ms}$ ， $r_0=0.00776 \text{ cm}$ ， $m=5$ ， $h(\tau_F)=0.015 \text{ cm}$ 。根据上面有关公式计算可得： $2r_0=0.01552 \text{ cm} > h(\tau_F)$ ， $\frac{r_0^2}{\alpha}=0.987 \text{ ms} > \tau_F$ ， $E=4.59 \text{ J}$ ， $k=9$ ， $\bar{E}=0.51 \text{ J}$ ， $p=2$ ， $E_p=2.3 \text{ J}$ ， $U=1648 \text{ V}$ ， $q=1.44 \times 10^7 \text{ W/cm}^2 > 10^7 \text{ W/cm}^2$ 。

2. 激光脉冲转盘调制打孔试验

在厚度为 0.13 cm 的 18CrNiWA 试片上要打出直径为 0.03 cm 的孔。现以不同的打孔方式作对比试验。试验条件及结果见表 1。从表 1 可以看出，各项精度指标（孔径的尺寸精度及圆度）、表面质量（表面光洁度）及打孔的稳定性，都是转盘超声调制法最好。在激光打孔试验时，激光器并非在非常好的条件下工作，如钹玻璃棒端面有麻点，脉冲氙灯及钹玻璃棒的冷却水套有一定锈蚀以及转盘调制时的机械振动干扰等，尽管打出的孔并不十分理想，但却可以更好地看出它们之间的差别来。试验表明，采用激光脉冲转盘调制法打孔，特别是采用转盘超声调制法打孔的效果还是十分显著的，这就为进一步提高打孔精度、表面质量及稳定性提供了一种新的工艺途径。

表 1

打孔方式	自由振荡	转盘调制	超声调制	转盘超声调制
工作电压 U (V)	1600	1600	1600	1600
氙灯闪光次数 p	2	2	3	3
脉冲宽度 τ (ms)	2.67	0.187	0.092	0.092
孔径尺寸精度 (mm)	0.0541 (IT10-11)	0.0549 (IT10-11)	0.0466 (IT10-11)	0.0365 (IT9-10)
圆度 (mm)	0.03 (不够级)	0.024 (11~12级)	0.015 (11~12级)	0.0079 (9~10级)
孔径不稳定性 (%)	17.12	12.8	10.73	7.4
表面光洁度	∇_6	∇_8	∇_{10}	∇_{11}

注：工作物质：钹玻璃 $\phi 8 \times 210 \text{ mm}$ ；光阑孔径： $\phi 6 \text{ mm}$ ；储能电容：1120 μF ；孔径不稳定性=孔径最大变化量/平均孔径；表面光洁度：用标准样块比较。

参加试验的还有 82 级毕业生王顺利、沈兆勇、桑德强和罗淑芬。

参 考 文 献

[1] H. H. 雷卡林等；“材料的激光加工”，科学出版社，北京，1982年，225页。

(1986年8月5日收稿)