

YAG 激光打标机光学系统设计及参数选择*

王加贤 张文珍

(华侨大学电气技术系, 泉州 362011)

摘要 进行掩膜法脉冲 YAG 激光打标机的研制工作, 介绍该机的光学系统, 导出标记工作面位置、标记线宽、象深与透镜焦距、物距之间的关系。

关键词 激光打标, 掩膜, 透镜

分类号 TN 249

在现代化的生产和管理中, 对各种产品的标记是很重要的。激光打标就是在物质表面, 用激光打上永久性标记, 与传统打标方法相比, 其优点是非接触性, 对工作面无压力不产生形变, 对物质表面无腐蚀不污染环境。它可用于电子元件的最后试验值和识别标记, 也可在货品及包装上打“使用期限”、“厂家”等。近年来我们研制了 YAG 激光打标机, 成功地在一些金属和非金属材料上打标。本文报道激光打标工作机理和打标机的光学系统设计, 分析工作面位置、标记线宽、象深与透镜焦距、掩膜位置等光学参数的关系。这对于实际加工中选择光学参数以提高打标质量有一定指导意义。

1 激光打标的工作机理

激光打标主要是利用激光与物质相互作用而产生的汽化效应, 在材料表面加工出所需要的字符⁽¹⁾。当激光照射到材料表面时, 被照射的材料吸收光能并迅速转变为热能, 导致表面层温度急剧上升, 当温度达到材料的汽化温度时, 材料表面因瞬时汽化、蒸发而出现标记痕迹。不同材料的汽化过程与激光参数以及材料的光学、热学特性有关。被标记的材料对不同波长和功率的激光, 各有不同的反应。如金属材料易于吸收波长 $1.06 \mu\text{m}$ 的激光能量, 而塑料、陶瓷、复合材料易于吸收波长 $10.6 \mu\text{m}$ 的激光。汽化效应与材料的热学性能也是密切相关的。材料表面被激光照射区中心的温度为⁽²⁾

$$T = 0.48 \frac{E}{K} \cdot \sqrt{\frac{\beta t}{\pi}},$$

式中 E 是激光功率密度, K 是材料的导热系数, β 是热扩散系数, t 是照射时间。由此可见, 激光功率密度越高, 材料的导热系数越小, 熔点越低, 则汽化效应越强。因此在激光打标中, 应根据材料的不同, 合理地选择激光器和设计光学系统, 使照射到材料表面的激光达到材料的汽化

* 本文 1995-01-14 收到

强度阈值.

2 YAG 激光打标系统

我们研制的 YAG 激光打标系统如图 1 所示. 光源采用脉冲 Nd : YAG 激光器, 半共焦腔

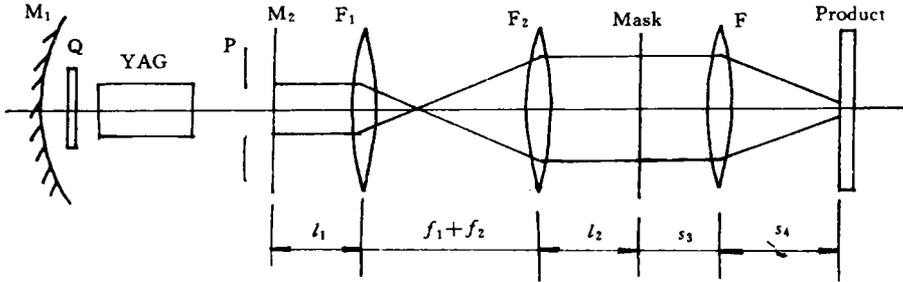


图 1 YAG 激光打标系统

结构, 凹面全反镜的曲率半径 $R=1\ 000\text{ mm}$, 腔长 $L=500\text{ mm}$, 腔内置一光阑 P 以获得单横模激光, 调 Q 后输出能量 150 mJ 、脉冲宽度 30 ns . 激光器输出光束经一共焦望远镜 F_1F_2 扩束和准直. 透镜 F_1 的焦距 30 mm , 与平面输出镜 M_2 的距离 $L_1=100\text{ mm}$; 透镜 F_2 的焦距 90 mm , 与掩模板距离 $L_2=50\text{ mm}$. 在薄铜片上把待打的字符、图案雕空制成掩膜, 光从雕空部分通过, 再经透镜 F 聚焦. 由于掩膜携带了要标记的标志信息, 其像必须成在工件表面, 所以工作面位置的确定是很重要的. 此外, 工作面的光功率密度、标记线宽和象深也是决定打标质量的关键因素.

3 光学系统设计及参数选择

3.1 光束的扩束和准直

激光器输出高斯光束的光腰在 M_2 上, 由 R, L 求得光腰半径 $\omega_{01}=0.40\text{ mm}$, 远场发散角 $\theta_1=0.97\text{ mrad}$. 由于掩膜较大 ($15\text{ mm}\times 15\text{ mm}$), 所以输出光束需经扩束后才能照到掩模板上所有雕空的部分. 为了达到扩束和准直二个目的, 采用倒装共焦望远镜系统, 扩束后光束的光腰半径 ω_{02} 、光腰与 F_2 距离 s_2 、远场发散角 θ_2 可由下式求出^[3]

$$s_2 = -M(f_1 + f_2) - M^2L_1, \omega_{02} = M \cdot \omega_{01}, \theta_2 = \theta_1/M,$$

式中 $M=f_2/f_1=3$. 把 L_1, ω_{01} 和 θ_1 的数值代入得到: $\omega_{02}=1.20\text{ mm}$, $\theta_2=0.32\text{ mrad}$, $s_2=-540\text{ mm}$ ($s_2<0$) 说明光腰在 F_2 的物方).

3.2 工作面位置的确定

激光打标不同于激光打孔和切割, 其工作面不能处于光腰平面, 而必须处于掩膜经透镜成像的象平面. 因为扩束后的高斯光束的共焦参数大于掩膜与透镜的距离, 所以不能运用几何光学中的成像公式来确定掩膜和像的关系; 又因为掩膜并非处于光腰平面, 所以也不能根据物方光束光腰与象方光束光腰的变换公式求像距. 为此, 我们采用光学传输矩阵和高斯光束的 q 参数表示法来确定工作面位置.

如图 2 所以, AB 为掩膜面, $A'B'$ 为其像平面. 物方光束的共焦参数 $Z_1=\pi \cdot \omega_{02}^2/\lambda=4\ 260$

mm, 掩膜面的光束半径 $\omega_a = \omega_{02} \cdot$

$\sqrt{(1+(a/z_1)^2)}$, 把 $a=L_2+|s_2|=590$ mm 代入得 $\omega_a=1.21$ mm. 通过 A, B 二点的波面曲率半径

$$R_a = Z_1 \cdot \left(\frac{a}{Z_1} + \frac{Z_1^2}{a} \right) = 31\,348 \text{ (mm)},$$

由于 R_a 远远大于 \overline{AB} , 所以粗略地认为波面与掩膜面重合. 设 q_A 和 q'_A 分别为 AB 和 A'B' 平面上光波的 q 参数

$$\left. \begin{aligned} q_A &= \frac{1}{R_a} - i \frac{\lambda}{\pi \omega_a^2} \triangleq x_1 - iy_1, \\ q'_A &= \frac{1}{R'_a} - i \frac{\lambda}{\pi \omega'_a{}^2} \triangleq x_2 - iy_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 R'_a 和 ω'_a 分别为 A'B' 平面光束半径和波面曲率半径. 光束从 AB 到 A'B' 的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & s_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f-s_4}{f} & \frac{f(s_3+s_4)-s_3 \cdot s_4}{f} \\ -\frac{1}{f} & \frac{f-s_3}{f} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

q_A 到 q'_A 的变换服从如下 ABCD 定律

$$q'_A = (Aq_A + B)/(Cq_A + D), \quad (3)$$

把(1)式和(2)式中的矩阵元代入(3)式得到

$$y_1/y_2 = \frac{1}{f^2} \cdot [A^2 + 2x_1AB + (x_1 + y_1)^2B^2], \quad (4)$$

令 $K=y_1/y_2$, 并计算 x_1, y_2 的值代入上式, 则

$$\begin{aligned} K \cdot f^2 &= (f-s_4)^2 + 6.4 \times 10^{-5} \times (f-s_4) \cdot [f(s_3+s_4) - s_3s_4] \\ &+ 6.5 \times 10^{-8} \cdot [f(s_3+s_4) - s_3s_4]^2. \end{aligned} \quad (5)$$

可以认为, 掩膜的像物比 β 等于象平面与掩膜平面的光束半径之比, 即 $\beta=\omega'_a/\omega_a=\sqrt{K}$. 对于所要求的像物比, 可选择不同的 f 和 s_3 参数. 我们计算了 $\beta=1/5, 1/10, 1/15$ 三种情况下, 取不同的 f 和 s_3 求得的像距 s_4 , 列于附表. 对于一组参数, s_4 有二个值, 一个大于焦距, 另一个小于焦距, 说明有二个掩膜像. 为了避免焦斑处空气击穿而损失激光能量, 工作面应置于焦斑内侧的掩膜像平面. 为便于比较, 根据下式

$$\left. \begin{aligned} a' &= \left[\frac{1}{f} - \frac{1}{b} \cdot \frac{1}{1+Z_1^2/b(b-f)} \right]^{-1}, \\ \omega'_{02} &= f \cdot \omega_{02} / \sqrt{Z_1^2 + (b-f)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

求出不同的 f, s_3 所对应的焦斑半径 ω'_{02} 及焦斑与透镜的距离 a' , 式中 $b=a+s_3$ 为入射光束光腰与透镜 F 的距离. ω'_{02} 随着 f 和 $|s_3-f|$ 的增加而增加, 而焦斑随着 f 的减小和 $|s_3-f|$ 的增加而靠近透镜焦点.

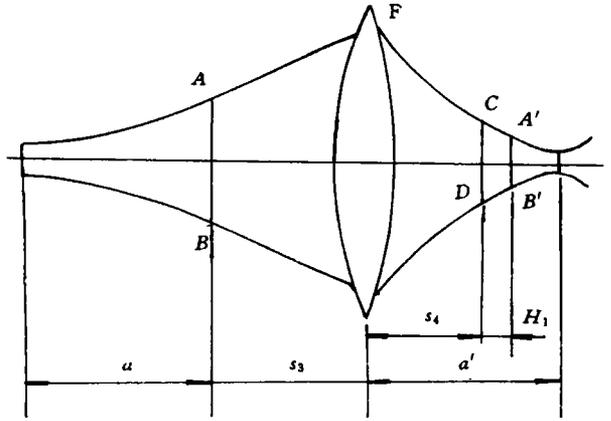


图 2 掩膜与像的变换关系

附表 像距与像物比,透镜焦距,物距的关系与其 s_3 值(mm)

| K | $f=30\text{ mm}$ | | | $f=70\text{ mm}$ | | | $f=120\text{ mm}$ | | |
|----------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|-------------------|--------|--------|
| | 10 | 40 | 500 | 10 | 80 | 500 | 10 | 130 | 500 |
| 0.04 | 24.02 | 24.03 | 24.19 | 56.16 | 56.21 | 56.62 | 96.55 | 96.75 | 97.72 |
| 0.01 | 27.03 | 27.04 | 27.13 | 63.24 | 63.28 | 63.56 | 108.96 | 109.13 | 109.72 |
| 0.000 44 | 28.04 | 28.04 | 28.11 | 65.65 | 65.68 | 65.92 | 113.39 | 113.54 | 114.03 |

由附表可看出,象物比越小,透镜焦距越小,掩膜像越靠近透镜焦点和光束焦斑;掩膜位置在小范围内变化对像距影响不大.因此减小像物比、采用短焦距透镜、使透镜远离掩膜,可使焦斑减小,光强分布更为集中,有利于提高工作面的激光功率密度.同时,由于标记线宽是由掩膜对入射光束的夫琅和费衍射所决定的,其值与透镜焦距成正比,所以若要得到清晰而精细的标记线条,也必须采用短焦距透镜.

3.3 不同参数的象深比较

实际操作中,待打标的工作面不一定刚好处于像平面,例如移到了 CD 平面,如图 2 所示.这时掩膜面上的一个点在 CD 面上的像就不是一个点,而是一个弥散斑.当弥散斑足够小时(小于眼睛的分辨角,约 $1'$),人看起来仍然有清楚的感觉.把象平面 $A'B'$ 与能分辨的最大弥散斑所对应的平面 CD 的距离的两倍称为象深 H ,如图 2 所示, $H=2H_1$.用几何光学中的成像公式易求出象深,但其结果不适合我们的打标机系统.为方便起见,我们不计算象深的绝对值,仅比较光束半径在象平面附近随着工作面移动的变化情况.变化率小,象深大;反之,则象深小.

在距象平面 S 处的光束半径为

$$\omega(s) = \omega'_{20} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{a' - s_4 + s}{Z_2}\right)^2}, \quad (7)$$

把 $Z_2 = \pi\omega'_{20}/\lambda$ 代入并求 $\omega(s)$ 对 s 的偏导数得

$$\left. \frac{\partial \omega(s)}{\partial s} \right|_{s=0} = \frac{\lambda}{\pi\omega'_{20} \cdot \sqrt{1 + \pi\omega'_{20}{}^4/\lambda^2 \cdot (a' - s_4)}}, \quad (8)$$

把(5),(6),(8)式结合起来,通过计算可知: f 越大, $|s_3 - f|$ 越小, $\frac{\partial \omega(s)}{\partial s}$ 值就越小.因此,为得到较大的象深,应选择较大焦距的透镜,并使掩膜尽量靠近透镜的物方焦点.

综合 3.2 和 3.3 的结论可知,象深与功率密度、标记线宽是相互制约、得此失彼.因此,在打标时应根据激光器输出功率、材料性质、像物比和标记线宽的要求,恰当地选择合适的透镜和安排掩膜位置.

4 结果与讨论

我们利用图 1 所示的激光器,输出功率密度约 $1.5 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,反复进行各种参数的比较实验.确定像物比为 $1/5$,望远镜系统的扩束比为 $3:1$,聚焦透镜焦距 $f=70\text{ mm}$ 、掩膜与透镜距离 $s_3=80\text{ mm}$.选择这些参数时,在铁、钢、铜等金属以及塑料和 PVC 材料上取得较好的打标效果.工作面在距透镜 56 mm 处前后移动 5 mm 仍可得到清晰的标记文字、符号,

在钢材料上打标线宽约 0.1 mm. 这些结果与前面理论分析一致, 为了进一步提高打标质量, 还要设法减小或消除由于光强径向分布不均匀(高斯分布)带来的字符深浅不一现象, 这一工作目前正在进行中.

本文为校科研基金资助项目.

参 考 文 献

- 1 王家金. 激光加工技术. 北京: 中国计量出版社, 1992. 116~118
- 2 刘东华. 激光加工的原理与器件. 激光杂志, 1992, 13(2): 88~90
- 3 周炳昆. 激光原理. 北京: 国防工业出版社, 1980. 336~337

Design of Optical System and Selection of Parameters for a YAG Laser Marking Device

Wang Jiaxian Zhang Wenzhen

(Dept. of Electric Technique, Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract A report is made on the development of a pulse YAG laser marking device by mask method, centering on the optical system of the device. In the report, the relation of marking work-surface location and marking line width and depth of field with focal distance of lens and object distance is derived. The results are of significance for selecting optical parameters and thus for improving marking quality.

Keywords laser marking, mask, lens