

文章编号: 0258-7025(2002)03-0271-06

# 模具表面的激光热处理研究

庄其仁, 张文珍, 吕凤萍

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建泉州 362011)

**提要** 对各种材料的模具表面激光热处理工艺进行了比较, 在不同工艺条件下得到了不同的效果, 并得到了较佳的工艺参数, 在模具表面激光热处理方面收到了良好的效果。

**关键词** 模具激光淬火, 激光热处理, 表面硬度

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

## Study of the Laser Heat Treatment for Mould Surface

ZHUANG Qi-ren, ZHANG Wen-zhen, LÜ Feng-ping

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362011)

**Abstract** The laser heat treatment for mould surface in different materials was compared. Under different condition, different results and optimal parameters were got, and good results in laser heat treatment for mould surface was obtained.

**Key words** mould laser quenching, laser heat treatment, surface hardness

随着新技术新工艺的发展, 有许多机械零件用传统的热处理已不能适用, 如一个元件中, 有些局部需要增加强度, 而其余部分则要求有一定韧性, 只有用激光热处理才能达到这种要求, 如模具、特种齿轮、导轨、汽缸等。由于模具的形状复杂, 加工工艺繁杂, 价格又贵, 它要求表面硬度高, 使模具的加工增加困难。模具表面热处理一直是机械加工领域中所重视的问题。我们认为, 对形状复杂的模具, 最理想的表面硬化是用激光淬火, 它几乎不变形, 表面硬度比常规热处理的硬度高, 并且更耐磨, 使用寿命更长。

### 1 模具表面激光热处理的机理探讨

由于激光加工的主要优点是能在工件局部范围内进行加热, 其余部分仍保持低温, 只要选择激光入射波长、功率、光斑尺寸及激光扫描速度就能控制模具处理部分的加热温度, 又由于激光加热速度及冷却速度均能达到  $10^3 \sim 10^4 \text{ }^\circ\text{C/s}$  以上<sup>[1]</sup>, 也就是说激光表面热处理是一种快速加热升温及快速冷却过

程, 所以激光表面热处理的模具具有独特的性能, 金属结晶颗粒小, 缺陷多而导致制品表面硬度高, 耐磨性好。

从机理上说, 激光被金属表面吸收后的最初产物并不是热量, 而是一种粒子的过剩能量——束缚电子的激发能, 自由电子的动能, 可能还含有过剩声子<sup>[2]</sup>, 由于金属材料是通过金属键相结合的, 其中存在着大量的自由电子, 如果激光入射模具表面, 光子被电子吸收, 使电子由原来的低能级状态跃迁到高能级状态, 这就是所谓的激光表面对金属做正功而将激光能量传递给金属。金属吸收激光能量后, 会将吸收的能量转化为晶格的振动, 使金属表面温度升高, 形成一热层, 该过程的热量转换及达到平衡的时间非常迅速, 理论上讲, 金属表面在激光作用下可在微秒或者更短的时间内达到相变温度, 甚至熔化温度。

用激光对模具表面热处理时, 由于加热速度快, 导致一些金属特性参数的变化<sup>[3]</sup>, 如奥氏体化起始温度  $A_c$  和马氏体转化温度  $M_s$  等。当加热速度大于

收稿日期 2001-11-08; 收到修改稿日期 2001-12-27

基金项目 福建省自然科学基金资助项目。

作者简介 庄其仁(1960—)男, 福建省泉州市人, 华侨大学电气工程与自动化系副研究员。现主要从事激光应用技术研究工作。E-mail: qzhuang@hqu.edu.cn

$10^3 \sim 10^4 \text{ }^\circ\text{C/s}$  时,奥氏体化开始温度和终了温度会明显向高温区移动。相变临界温度变化的表达式为

$$\Delta T = \left( \frac{3}{4} D^{-1} K^2 a_0^2 \right)^{1/3} V^{1/3}$$

式中  $\Delta T$  为临界点温度的位移量,  $D$  为扩散系数,  $K$  为由 Fe-C 相图决定的参数 ( $K = 110^\circ\text{C}$ ),  $a_0$  为珠光体的层间距 ( $a_0^2 = 10/\rho$ ),  $\rho$  为钢中位错密度,  $V$  为加热速度。我们对正火态 45# 钢模拟计算,取  $D = 3.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $\rho = 10^9/\text{cm}^2$ ,  $V$  取  $10^3 \text{ }^\circ\text{C/s}$  时,  $\Delta T = 67.1^\circ\text{C}$ ; 当  $V$  取  $10^4 \text{ }^\circ\text{C/s}$  时,  $\Delta T = 144.6^\circ\text{C}$ 。可见激光热处理时,  $A_c$  的上升可达  $100^\circ\text{C}$  以上,并且与材料的初始状态及加热速度有关。文献 [3] 通过激光热处理实验测得  $A_c$  在  $770 \sim 780^\circ\text{C}$ 。所以在激光热处理过程中,激光功率应该使钢样表面温度达到奥氏体相变范围内才能使处理的效果最好。

## 2 模具表面激光热处理的工艺研究

### 2.1 实验条件

实验用 2 kW HJ-4 型  $\text{CO}_2$  激光器,波长  $10.6 \mu\text{m}$ ,光斑尺寸  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  或  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ,扫描速度为  $10 \sim 12.2 \text{ mm/s}$  或  $20 \sim 23 \text{ mm/s}$ 。被处理材料选用 45# 钢, 20Cr,  $A_3$  钢的模具等,由于激光热处理具有许多优越的条件,所以我们选择这三种钢材样品,其目的是要探讨能否代替其他价格比较昂贵的模具材料。激光模式为多模及低阶模两种;模具材料采用表面磷化、涂石墨、涂烟灰三种办法进行黑化以增加对激光的吸收率。所有处理的材料采用 HX-1000 型显微硬度计测定钢样表面硬度,并用其金相部分观察、分析金相组织的变化情况,同时用

HITACHIS-570 型扫描电子显微镜观察显微组织变化情况。激光热处理示意图见图 1。

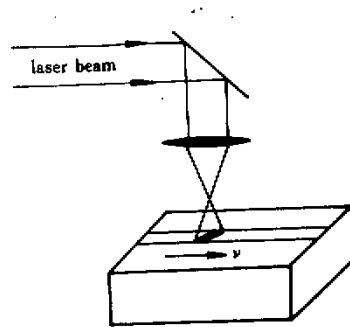


图 1 激光热处理示意图

Fig.1 Laser heat treatment

### 2.2 实验结果

#### 2.2.1 不同基质坯料模具的激光表面热处理情况

模具的坯料钢样分别为  $A_3$  钢, 20Cr 钢及 45# 钢,  $P = 500 \text{ W}$ ,  $v = 22 \text{ mm/s}$ , 光斑尺寸为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  磷化处理。激光热处理前后的硬化带硬度平均值见表 1。

为了了解激光淬火硬化带硬度均匀性情况,测定了三种钢样经激光淬火后硬化带截面上的硬度分布情况,发现三种钢样表面硬度在横向的分布都是均匀对称的,只要选用合适的工艺参数就能得到较均匀的硬度分布,其中 45# 钢表面平均硬度可达到  $\text{Hv}800$  左右,处理效果最好。用线切割切出硬化带断面钢样,用金相法可以观察到硬化断面区域。硬化深度方向的形状为半月形,从中间测得硬化带最大深度约为  $0.5 \text{ mm}$  (见图 2)。

表 1 不同基质模具激光处理前后的表面平均硬度

Table 1 Surface average hardness of mould with different materials before and after treatment

Sample	C / %	Before treatment		After treatment	
		Hv	HRC	Hv	HRC
$A_3$	0.20 (experiment value)	175.0	< 15	442.2	46.5
20Cr	0.17 ~ 0.24	231.2	21.0	683.0	58.8
45#	0.42 ~ 0.50	254.2	25.5	847.2	64.7

#### 2.2.2 不同黑化条件下的激光热处理

以 45# 钢为坯料的模具为例,激光功率为 700 W (多模),扫描速度  $12.2 \text{ mm/s}$ ,光斑尺寸约  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ,采用化学磷化、涂石墨、涂烟灰三种不同的黑化条件作比较,激光处理后的表面硬度见图 3(a)~(c)。图中的硬度分布是根据 HX-1000 型显微硬度

计所测定的钢样硬化带各点硬度分布而得到的。结果表明,激光表面热处理的硬度效果为:磷化  $\geq$  涂石墨  $>$  涂烟灰。45# 钢在热处理前的表面硬度为  $\text{Hv}200$  左右,处理后情况为:磷化钢样  $\text{Hv}850$ ,提高硬度  $\text{Hv}650$ ,硬化带均匀;涂石墨钢样  $\text{Hv}800$ ,提高硬度  $\text{Hv}600$ ,硬化带均匀;涂烟灰钢样  $\text{Hv}500$ ,提高硬度

Hv300, 硬化带不稳定。从而认为, 激光热处理模具表面时用磷化钢样效果最佳, 45# 钢为坯料的模具经激光热处理后表面硬度可以达到 Hv850(HRC65) 以上。用涂石墨黑化时只要是均匀, 也能达到同样的效果, 如果是大型模具又需要局部硬化, 利用涂石墨黑化比较方便, 又能达到模具的使用要求。对于涂烟灰黑化情况, 由于烟灰为我们自己简易制造的产品, 颗粒度不均, 涂覆均匀有一定难度, 所以激光

处理后的结果不理想。但我们认为, 黑化处理主要目的是增加钢样表面对激光的吸收率, 只要黑化均匀, 能达到增加样品对激光的吸收率(80% 以上), 提高被处理件表面硬度就可以了, 所以根据实际需要, 采用合适的黑化条件都能达到要求。我们同样对 20Cr, A<sub>3</sub> 钢进行了上面的三种黑化处理, 结果与 45# 钢相似, 只是硬度值有些不同。

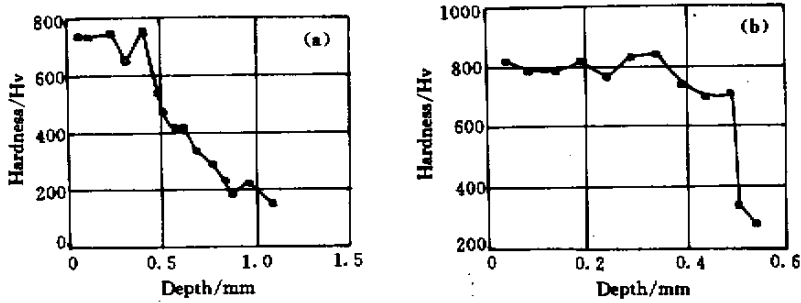


图 2 钢样硬化带深度方向的硬度分布

(a) A<sub>3</sub> 钢 (b) 45# 钢

Fig.2 Hardness distribution of steel samples in depth direction

(a) A<sub>3</sub> steel ;(b) 45# steel

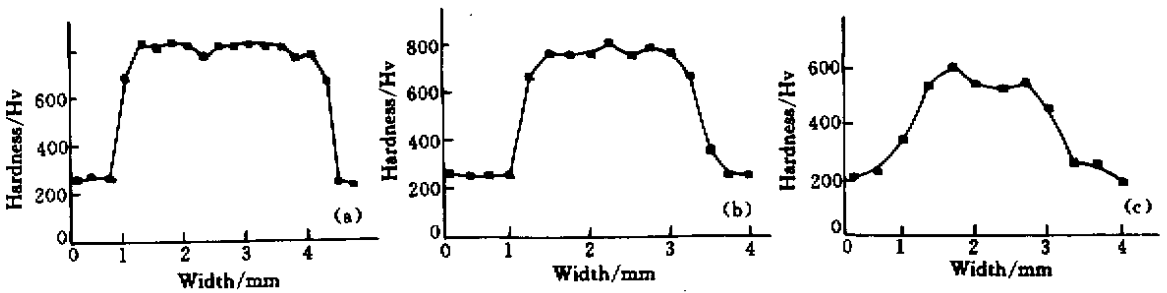


图 3 不同黑化条件下硬度的横向分布

Fig.3 Transverse distribution of hardness in different condition

(a) phosphorus treatment(  $P = 700 \text{ W}$  );(b) carbon treatment(  $P = 700 \text{ W}$  );(c) cigarette ash treatment(  $P = 700 \text{ W}$  )

2.2.3 不同激光模式、不同激光功率处理模具的情况

分别采用 10.6 μm 的多模和低阶模激光束, 功率均为 500 W, 扫描速度 12.2 mm/s, 光斑尺寸为 3 mm×3 mm, 磷化处理 45# 钢表面, 经处理后的结果表明, 模具的表面硬度均达到 Hv800 以上, 虽然激光的模式不同, 但结果基本相同, 说明激光模式的不同并不影响钢样表面的淬火硬度, 但用多模激光模式处理时, 硬化带会更均匀一些。因此采用多模激光对模具表面热处理更合适。

分别采用  $P = 700 \text{ W}$ , 500 W, 400 W 的不同功

率, 多模激光, 磷化处理, 对 45# 钢模具进行表面热处理硬度效果见图 3(a), 图 4(a)(b), 当  $P = 700 \text{ W}$  及 500 W 时, 模具表面硬度均能达到 Hv850 左右 (HRC65), 满足了一般模具表面硬度的要求, 而当  $P = 400 \text{ W}$  时, 模具表面硬度只能达到 Hv600~700, 并且硬化带硬度也不均匀。我们认为, 用激光处理模具表面时, 只要能达到相变温度(780℃ 以上) 的功率就可以了, 在同一扫描速度下, 如果功率太高, 将会使模具产生表面局部熔化或其他现象; 如果功率太低, 不能达到表面均匀硬化的效果, 硬度也提不高。所以, 选择合适的激光功率是必要的。

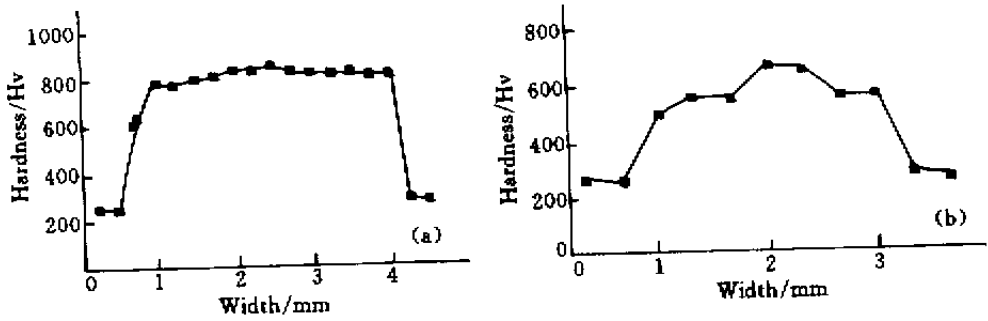


图4 不同激光功率处理45#钢后硬度的横向分布

Fig.4 Hardness transverse distribution of 45# steel for different laser power

(a)  $P = 500 \text{ W}$ ; (b)  $P = 400 \text{ W}$ 

### 2.2.4 激光束交叠处理模具表面的情况

由于模具有时需要大面积的表面硬化区域,所以我们试验了激光束交叠处理的硬度分布情况。模具坯料为45#钢,磷化处理 $P = 500 \text{ W}$ (多模), $v = 12.2 \text{ mm/s}$ ,光斑尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ,当两道交叠处理时硬度分布见图5。结果表明:当取一定激光处理交叠量时,硬化带的硬度在交叠区出现有一较窄区域的回落现象<sup>[4]</sup>,回落区宽度约为 $0.1 \text{ mm}$ 左右,硬度降落的最低点可以达到 $\text{Hv}400$ 左右(均匀硬化带硬度为 $\text{Hv}850$ 左右)。同时发现,如果激光束交叠量选取适当时,可以使硬度回落区缩小。

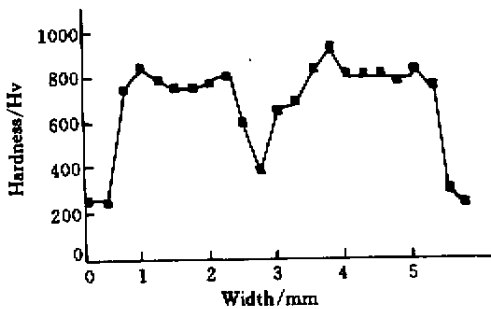


图5 激光交叠处理表面硬度的横向分布

Fig.5 Transverse distribution of mould surface hardness after laser overlapping treatment

### 2.3 结果分析

材料原始组织状态对激光淬火的效果影响很大。图6(a)~(c)分别为 $A_3$ 钢、45#钢和20Cr的原始组织金相照片。从照片上可以看出,这三种样品的原始组织都是由铁素体和珠光体组成的,在 $A_3$ 钢中珠光体含量较少,而45#钢中的珠光体含量相对较多,并且它们的晶粒都较粗大。20Cr中的组织也是铁素体和珠光体组织,只是由于Cr元素的存在,其

中铁素体的一部分为合金铁素体,珠光体中存在有稳定性较渗碳体更高的合金渗碳体 $(\text{Cr}, \text{Fe})_3\text{C}_3$ ,它难溶于奥氏体,较难聚集长大,原始组织结构比 $A_3$ 钢略细,所以20Cr的强度和硬度较 $A_3$ 钢更高。图7(a)~(c)分别为 $A_3$ 钢、45#钢和20Cr原始组织的电镜照片,从照片中可以看出 $A_3$ 钢中珠光体为层片状组织,渗碳体和铁素体片排列均匀。而45#钢珠光体中渗碳体和铁素体片在不同晶粒内有不同的位相,并且不同位相的晶粒内层间距也不同。20Cr珠光体中由于Cr元素的存在形成的合金渗碳体难以聚集长大,而形成短棒状的渗碳体结构。原始组织的不同会在一定程度上影响激光热处理后的效果。

激光功率为 $700 \text{ W}$ (多模),扫描速度 $12.2 \text{ mm/s}$ ,光斑尺寸约 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ,化学磷化黑化条件下对 $A_3$ 钢、45#钢和20Cr的激光热处理组织金相照片和电镜照片见图6(d)~(f)和图7(d)~(f)。图6(d)为 $A_3$ 钢中相变硬化区的金相组织。由此可见, $A_3$ 钢经激光热处理后得到了组织性能较优越的板条马氏体组织,它既具有较高的强度又具有较好的韧性,其中的亚结构为高密度的位错,激光热处理后组织中的位错密度可达 $10^{12}/\text{cm}^2$ <sup>[4]</sup>,它有效地提高了金属材料的强度和硬度。图7(d)为 $A_3$ 钢经激光热处理得到板条马氏体的电镜照片。图6(e)为45#钢的相变硬化区的金相照片。可见45#钢经激光热处理后可得到隐晶马氏体组织,其中是板条马氏体、针状马氏体和少量残余奥氏体的混合组织。激光热处理是瞬时的加热冷却过程,碳在奥氏体中的扩散很不充分,碳的分布很不均匀,因此一般中碳钢在激光热处理后可以得到低碳的板条马氏体和高碳的针状马氏体的混合结构。板条马氏体和针状马氏体中的亚

结构分别为位错和孪晶 , 而马氏体针的边缘也有复杂的位错存在 , 它们均能引起强化效应 , 尤其是孪晶对针状马氏体的硬度和强度作出的贡献更为明显。残余奥氏体一般是一个相对软相 , 但在激光热处理后得到的残余奥氏体是一个经细化了的组织 , 并且也含较高密度的位错 , 它不但不会引起硬度下降 , 而且还会起到一定的强化作用。正因为这样 ,  $A_3$  钢经激光热处理后可得到较常规热处理方法高的表面硬度。图 7 (e) 为  $45\#$  钢经激光热处理后得到的马氏体组织电镜照片。从照片可以见到明显的颗粒状杂质存在。由于激光热处理的时间较短 , 引起的杂质溶解就可能不太充分 , 这与常规热处理不同。图 6 (f) 为  $20Cr$  经激光热处理后硬化区域的金相组织。得

到的是隐晶马氏体 , 主要为板条结构。图 7 (f) 为  $20Cr$  经激光热处理后硬化区的电镜照片。由于其中  $Cr$  的存在 , 它所形成的合金碳化物相对渗碳体稳定 , 难溶于奥氏体 , 也较难聚集长大 , 在热处理后 , 弥散于组织中 , 同时  $Cr$  对奥氏体的长大起到一定的阻碍作用 , 对细化晶粒作出一定贡献。从图 7 (f) 可见 ,  $20Cr$  经激光热处理后组织中弥散着细小的组织 , 其马氏体形态没有  $A_3$  钢处理后的板条组织那么清晰明显 , 并且组织更细化。同时这种合金碳化物本身的硬度就较高 , 它在激光热处理后 , 弥散于组织中 , 对获得高硬度和高强度的作用较大。正因为  $Cr$  的存在  $20Cr$  经激光处理后的硬度就比相同含碳量的  $A_3$  钢高得多。

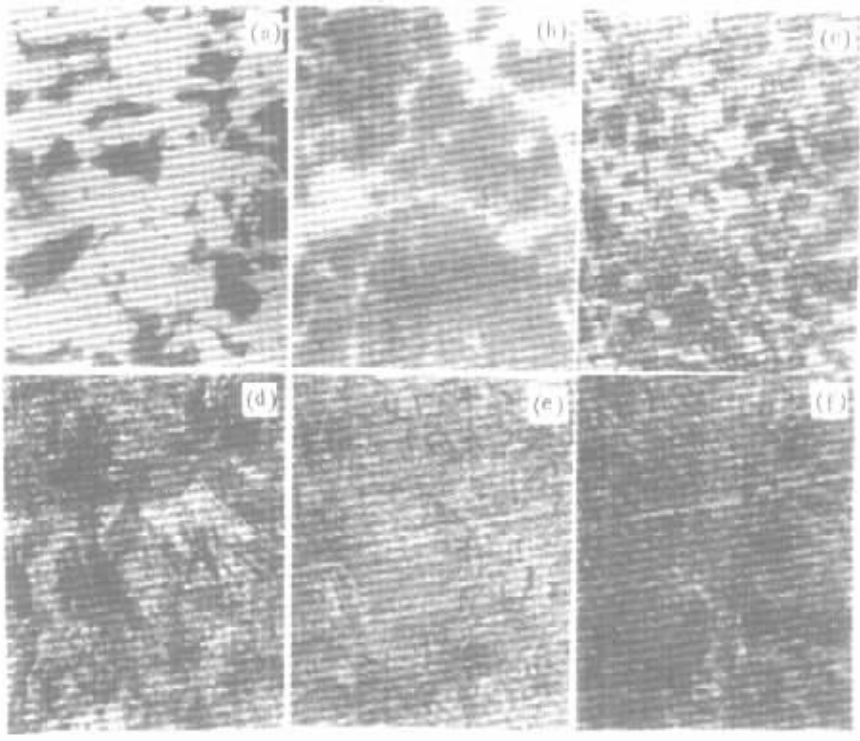


图 6  $A_3$  钢  $45\#$  钢和  $20Cr$  在激光热处理前 (a)~(c) 及热处理后 (d)~(f) 的显微组织金相照片 (750 $\times$ )

Fig.6 Microstructures of  $A_3$  ,  $45\#$  and  $20Cr$  before laser treatment (a)~(c) and after laser treatment (d)~(f) (metallographic 750 $\times$ )

综上所述 ,  $A_3$  钢和  $20Cr$  钢处理后得到板条马氏体而  $45\#$  钢处理后得到板条马氏体和针状马氏体混合组织 , 板条马氏体中的亚结构为高密度的位错 , 对高硬度的获得作出贡献 , 针状马氏体中的亚结构为孪晶 , 而且马氏体针的边缘也富含高密度的位错 , 对高硬度的贡献也较大。同时激光热处理过程中组织细化 , 并得到高碳马氏体 , 提高了硬度。因此 , 晶粒细化、高的马氏体含量、马氏体高位错密度和固溶含

碳量是获得超高硬度的主要原因。

### 3 结束语

模具表面激光热处理是一门崭新的工艺 , 根据我们的实验结果 , 采用合适的工艺条件 , 如用磷化黑化 , 激光功率选取  $P = 500 \sim 700\text{ W}$  , 扫描速度  $10 \sim 20\text{ mm/s}$  , 光斑合适 , 含碳量适中的基质模具 , 经过激光表面热处理后完全可以大幅度地提高模具表面硬

度(HRC 达到 65 以上)及耐磨性,大大地增加了模具的使用寿命。我们已经用本方法处理过各种材料的模具表面,除了上述的 45# 钢等三种外,还有 718 钢, T10A 钢, 40Cr, Cr12, 3Cr2W8V 及各种高温钢材料

的模具。如灯具模具、钟表业模具、陶瓷模具、冷气机散热片模具、汽车刹车及摩托车各种型号的模具等,已经收到了良好的效果。利用激光表面热处理还可以寻找更便宜、更合适的模具基质材料。

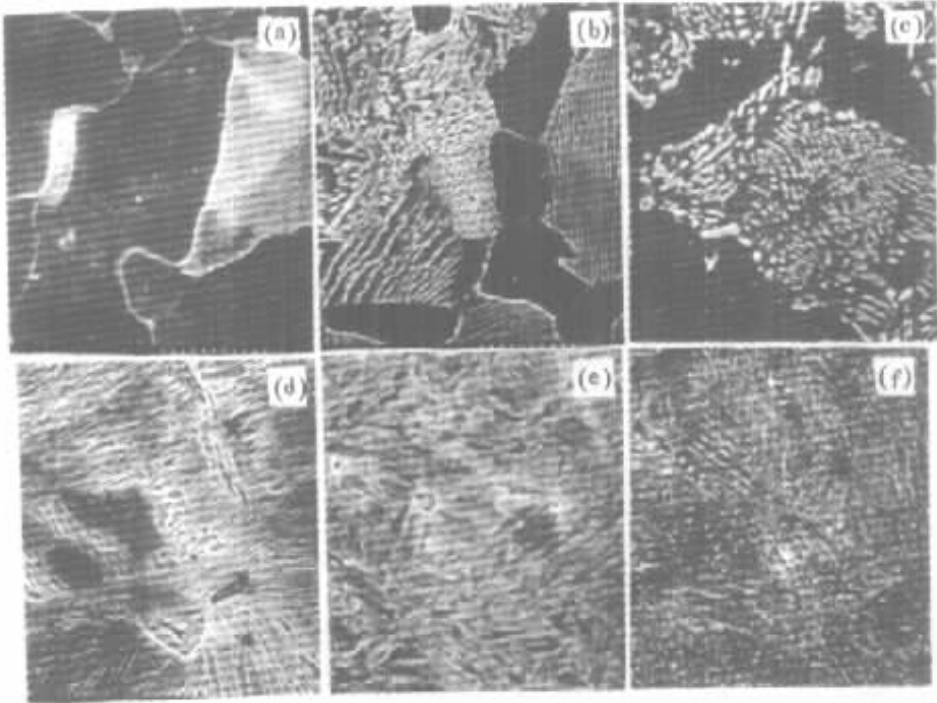


图 7 A<sub>3</sub> 钢 45# 钢和 20Cr 激光热处理前后组织的电镜照片

(a) 处理前 A<sub>3</sub> 钢(3000×)(b) 处理前 45# 钢(3500×)(c) 处理前 20Cr(5000×);

(d) 处理后 A<sub>3</sub> 钢(4000×)(e) 处理后 45# 钢(4000×)(f) 处理后 20Cr(5000×)

Fig.7 SEM of A<sub>3</sub>, 45# and 20Cr steel

(a) A<sub>3</sub> before laser treatment (3000×);(b) 45# before laser treatment (3500×);(c) 20Cr before laser treatment (5000×);

(d) A<sub>3</sub> after laser treatment (4000×);(e) 45# after laser treatment (4000×);(f) 20Cr after laser treatment (5000×)

## 参 考 文 献

- 1 Wu Xufeng, Zhang Wenzhen, Guo Hengqun. Investigation on laser heat treating of low-carbon steel [ J ]. *Journal of Optoelectronics · Laser* ( 光电子 · 激光 ), 1998, 19( 4 ) 330 ~ 332 ( in Chinese )
- 2 M. V. Allmen. *Laser-beam Interactions with Materials Physical Principles and Applications* [ M ]. Beijing : Science Publishing Company, 1994. 49 ~ 50 ( in Chinese )
- 3 Chin-Chang Chen, Chun-Ju Tao, Lih-tyan Shyu. Eutectic temperature of carbon steel during laser surface hardening [ J ]. *J. Mater. Res.*, 1996, 11( 2 ) 458 ~ 468
- 4 Wu Xufeng, Zhang Wenzhen, Guo Hengqun. Experimental investigation of laser overlapping treatment [ J ]. *Applied Laser* ( 应用激光 ), 1999, 19( 1 ) 7 ~ 10 ( in Chinese )