

# 碳素钢激光淬火组织性能的研究

蒲万林 彭爱平 缪辉华\*

(华中工学院)

**提要:** 对六种碳素钢的激光淬火组织性能进行了研究。提出能达到的硬度值,分析了组织变化规律及异常现象。

## Study on structure and property of laser hardening of carbon steels

Pu Wanlin, Pen Aiping, Miao Huihua

(Huazhong Institute of Technology)

**Abstract:** In this article the structures and properties have been studied on six carbon steels in laser hardening. The rule for structural changes and unusual phenomena occurring in laser hardening have been analysed.

表1 淬火区尺寸及硬度值

钢号	淬火区宽度 (毫米)	淬火区深度 (毫米)	高台阶硬度 Hm	低台阶硬度 Hm
10	1.5~1.7	0.2~0.4	450	300~350
20	1.5~2.0	0.2~0.4	550	350~450
35	1.5~1.7	0.18~0.28	850	500~700
45	1.6~2.1	0.25~0.4	900	500~700
60T2	1.6~2.5	0.2~0.5	1000	无低台阶
T8A	1.5~2.3	0.2~0.4	1100	无低台阶

## 一、前言

虽然激光热处理已有十几年历史,有的国家已将其用于处理汽车零件、远洋万吨级轮船上的汽缸和常规热处理不能处理的内孔壁等,但从理论上研究还很不够。本文拟通过对六种碳素钢的试验研究,着重探讨在激光加热条件下的组织变化规律,分析组织变化的异常现象。

## 二、试验结果与讨论

我们对10钢、20钢、35钢、45钢、60T2钢和T8A等六种钢进行激光淬火试验,各种材料在适当的规范参数下获得的淬火区尺寸和硬度值列于表1。

### 1. 激光淬火区的金相组织

图1为45钢的基体组织照片,图2为45钢激光淬火组织的金相照片。由于激光的加热速度极高,可达 $10^3 \sim 10^4$ °C/秒;相变温度以上停留的时间极短,只有 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 秒数量级,因而奥氏体化程度是很不一致的。

收稿日期:1982年9月15日。

\* 参加本试验研究的还有奚素碧、曹世英和谢群集团。

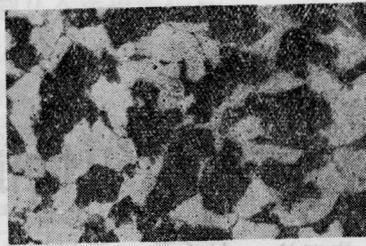
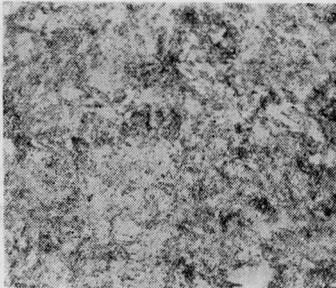
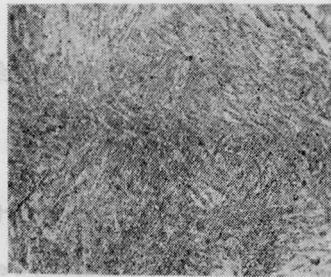


图1 45钢的基体组织

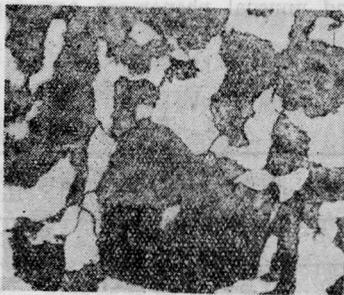


500×

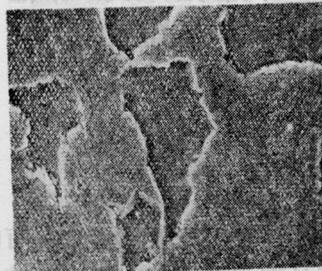


5000×

(a) 完全淬火区组织

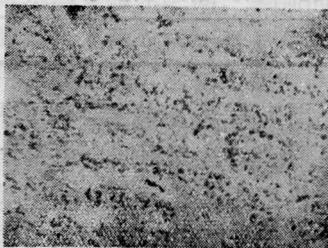


500×



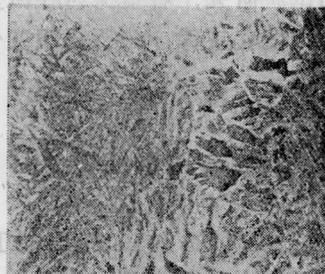
5000×

(b) 不完全淬火区组织



×13000

(c) 不完全淬火区原珠光体处复膜照片



×5000

(d) 完全淬火区与不完全淬火区交界处

图2 45钢激光淬火组织(高倍的为电镜照片)

对于加热过程中处于  $A_{c3}$  以上的区域, 虽然停留的时间很短, 但由于温度高, 过热度大, 并且在后续的冷却过程中, 位于  $A_{c3}$  以上的区域还可以继续奥氏体均匀化, 因而奥氏体的成分比较均匀, 可得到比较均匀的马氏体, 本文称为完全淬火区, 如图 2(a) 所示。图 2(a) 左图为光镜照片, 右图为电镜照片。从电镜照片可以看出, 马氏体的形态是很细小的, 由此可知处于  $A_{c3}$  以上区域的奥氏体晶粒尚来不及长大, 也是很细小的。

从图 2(b) 可以看出, 对于处于  $A_{c1} \sim A_{c3}$  温度的组织, 基本上保留了原珠光体和先共析铁素体的晶粒形态。比较图 1 和图 2 可以看出, 铁素体块已缩小了。在加热过程中, 原为珠光体的转变成为奥氏体, 铁素体只是部分地转变为奥氏体。在冷却过程中, 奥氏体转变为马氏体, 而未发生相变的铁素体, 其硬度未发生变化。经过腐蚀的试片在电镜下观察, 铁素体块明显地从镜面陷下, 马氏体呈岛状分布, 我们称为不完全淬火区。

不完全淬火区内, 尽管基本上保留了原组织的形态, 似乎经过淬火热循环后, 组织未细化, 其实不然, 从图 2(b) 电镜照片可知, 一颗颗原珠光体晶域经激光淬火后, 晶域内不存在粗大的贯穿式针状马氏体, 而是由极为细小的马氏体所组成。完全淬火区与不完全淬火区内的马氏体极为细小, 这正是激光淬火韧而不脆, 较常规热处理硬度高的原因之一。

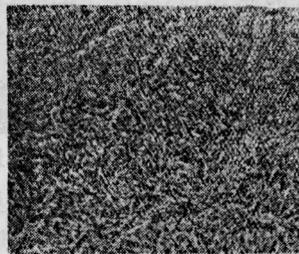
在图 2(b) 的光镜照片上还看到一个有趣的现象。一个珠光体晶域处于基体和不完全淬火区的交界处, 处于不完全淬火区的一半呈暗白色, 而另一半则和基体中珠光体的颜色一样, 两者的显微硬度有明显差别。前者具有高碳马氏体的硬度, 表明淬火了, 后者硬度不高, 表明没有淬上火。这也说明激光淬火的热循环是很快的。

从图 2(c) 复膜电镜照片清楚地看出, 珠光体奥氏体化过程的第三、四阶段进行不充分, 有相当数量的残余渗碳体没有溶入奥氏

体。奥氏体中碳的扩散不均匀, 故冷却后仍呈现出珠光体层片状的痕迹。

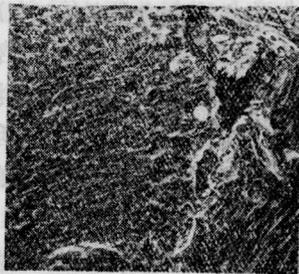
图 2(d) 为完全淬火区与不完全淬火区交界处的电镜照片, 可以看出在完全淬火区一侧, 马氏体比较均匀, 在不完全淬火区一侧, 其均匀程度降低, 并夹有先共析铁素体块。

对于含碳量接近共析成分的 60T2 和 T8A 钢来说, 由于  $A_{c1} \sim A_{c3}$  或  $A_{c1} \sim A_{cm}$  之间的温度区间很小, 所以不完全淬火区很窄, 完全奥氏体化的终了温度较低, 且原始组织基本上由珠光体组成, 碳均匀化需要扩散的距离大为减少, 因而奥氏体成分均匀化的程度比亚共析钢充分, 能得到极为细小的均匀的马氏体。图 3 为 60T2 钢淬火组织的电镜照片, 其中图 3(b) 为 60T2 钢淬火区与基体交界处的组织, 右边部分为尚未转变的珠光体, 左边为已经过淬火的马氏体, 但还可以明显地看到珠光体层片状的痕迹。图 4 为 T8A 钢的淬火组织照片, 从图 4(b) 的电镜照片可



3000×

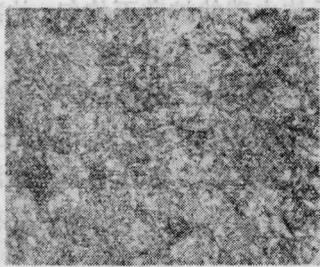
(a) 完全淬火区



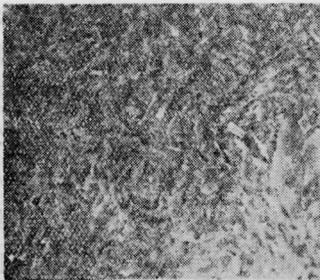
3000×

(b) 淬火区与基体交界处附近

图 3 60T2 钢的淬火组织



500×  
(a)



5000×  
(b)

图4 T8A钢的淬火组织

以看到,除了均匀细小的马氏体以外,还存在少量未溶解的碳化物(照片中的小白块)。

总之,碳素钢激光淬火时的组织变化存在一定的规律性。亚共析钢位于  $A_{c3}$  以上区域的奥氏体均匀化较好,  $A_{c3}$  附近奥氏体成分均匀化不够;而处于  $A_{c1} \sim A_{c3}$  区域内的基本上只有珠光体转变为奥氏体,且奥氏体化极不充分,仍保留有原珠光体层片状的痕迹。共析钢奥氏体均匀化比较充分,但也会出现未溶解的碳化物。

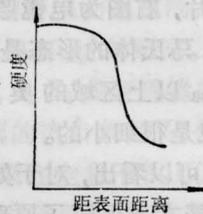
## 2. 激光淬火硬度曲线的“双台阶”

由表1的试验结果可知,凡含碳量在0.45~0.50%以下的低、中碳钢,激光淬火以后沿深度方向的硬度曲线都出现“双台阶”,即高台阶和低台阶;而高碳钢的硬度曲线则不出现有这样的“低台阶”。

亚共析钢的硬度曲线出现“双台阶”,与它们在激光加热和冷却过程中的组织变化密切相关。加热时若温度低于  $A_{c1}$ ,则组织不发生变化,冷却后的硬度为基体珠光体加铁素



(a) 低、中碳钢



(b) 高碳钢

图5 碳素钢激光淬火硬度曲线示意图

体的平均硬度,对应于曲线上的  $a$  点。当加热稍高于  $A_{c1}$  点时,珠光体全部转变为奥氏体,冷却后的组织为马氏体加铁素体,硬度突然升高,硬度曲线上出现了“低台阶”,其硬度值是马氏体与铁素体的平均硬度值,对应于曲线上的  $bb'$  段。在  $A_{c1} \sim A_{c3}$  温度区间对应于曲线上  $b'c$  段的硬度值,是  $A_{c1} \sim A_{c3}$  温度区间铁素体与马氏体的平均硬度值。随着温度升高,铁素体逐渐转变为奥氏体的量增多,则冷却后马氏体的量增多,平均硬度也升高。当温度超过  $A_{c3}$  时,全部转变为奥氏体,冷却后得到全为马氏体的组织,因而在曲线上出现了从  $c$  点开始的“高台阶”。我们曾经分别测定过低台阶区内的马氏体和铁素体的显微硬度,发现马氏体的硬度相当于高碳马氏体的硬度,而铁素体的硬度与基体中的相当,这就说明“双台阶”的出现是组织变化的必然结果。

亚共析钢硬度曲线的低台阶长度,随着钢中含碳量的增加而变窄,这是因为愈接近共析成分,其  $A_{c1} \sim A_{c3}$  的温度区间愈小。

对于过共析钢,没有进行试验,推测沿深度方向的硬度分布也应为单台阶,因为处于  $A_{c1} \sim A_{cm}$  的温度区间,其组织转变为奥氏体加未溶碳化物,冷却后为马氏体加碳化物。可

能还有残余奥氏体，但由于马氏体和碳化物的硬度都很高，与表层的完全淬火区没有大的差别，所以不会出现“双台阶”。

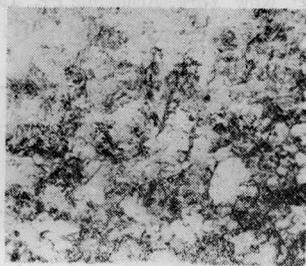
### 3. 晶粒度对激光淬火组织的影响

在试验中对两种晶粒度不同的 20 钢进行了激光淬火处理，它们的原始晶粒度分别为 5 级和 8 级，处理后的淬火深度基本相同，可是淬火后组织和性能的差别很大。

图 6 为 8 级晶粒度的 20 钢激光淬火后所得到的组织，完全淬火区为马氏体，不完全淬火区为马氏体加铁素体，属于激光淬火的正常状态。

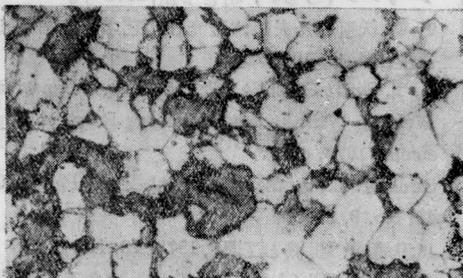


500×



3000×

(a) 完全淬火区



500×

(b) 不完全淬火区

图 6 20 钢(晶粒度 8 级)淬火组织



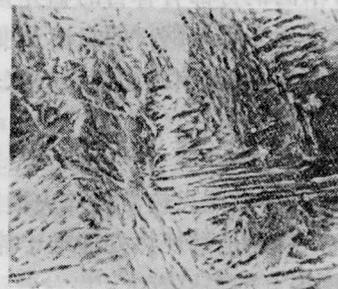
100×

(a) 全貌



500×

(b) 图(a)方框中的放大



3000×

(c) 图(b)中高硬度的马氏体(原珠光体区)放大

图 7 20 钢(晶粒度 5 级)淬火组织

图 7 为 5 级晶粒度的 20 钢淬火后的组织，由于晶粒粗大，在激光的急冷急热条件下，不可能实现奥氏体的均匀化，原珠光体的区域容易转变成奥氏体，但因碳原子来不及扩散均匀，含碳量较高，因而形成高碳马氏体，其硬度达  $H_m 800$  以上。原铁素体区域，由于时间太短，只有靠近珠光体的那一部分铁素体转变为奥氏体，而其余大部分被残留下来未发生转变，冷却后形成低碳马氏体和残留铁素体。我们测量过马氏体和铁素体交界处的硬度为  $H_m 400 \sim 500$ ，而淬火区未发生相变的铁素体块的硬度只有  $H_m 150 \sim 250$ ，图 7(b) 中五个硬度压痕说明了这一点。

从试验结果来看，当钢中含碳量小于 0.3% 时，原始晶粒度对激光淬火硬化影响很大，原始晶粒度越细小，奥氏体化速度越快，组织和硬度分布愈均匀；晶粒粗大的原始组织

不能得到均匀的淬火层,马氏体在淬火层中呈岛状分布。含碳量大于0.35%以上的钢由于铁素体的数量相对减少,晶粒度对硬度的影响也相应减小。由此可见,对于低碳钢,为了获得理想的淬火效果,必须对需要处理的零件提出晶粒度的要求。

我们还对T8A、45钢和10钢的淬火组织进行了回火处理,发现碳素钢激光淬火与常规淬火加回火后的硬度基本相同,碳素钢激光淬火零件的抗回火性并不优越。

对试样厚度造成的影响也进行了研究,发现各种不同钢材都有各自的临界厚度值,试样厚度小于它时,钢材的自冷速度会低于其临界冷却速度,影响激光淬火的效果。

### 三、结 论

1. 一般激光淬火较常规淬火提高硬度15~20%,特别是常规热处理难于淬火的低碳钢,硬度提高的幅度较大。

2. 在研究的几种钢中,淬火组织为马氏体,虽然放大3000×或5000×,但马氏体的形态仍很细小。

3. 在亚共析钢的不完全淬火区看到一

(上接第758页)

表4 不同扫描速度的冷却速度

扫描速度 V(厘米/秒)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta t$ (秒)	冷却速度 (°C/秒)
1.3	566	0.1588	3679
1.6	499	0.1246	3968
2.0	459	0.1000	4590
2.4	424	0.0833	5088

大于加热速度。无论是加热速度还是冷却速度都是常规热处理方法无法达到的,尤其是冷却速度,它较常规热处理淬火工艺高一个数量级。从图6也可知道,当 $\alpha$ 变小时金属表面温度要增高,若超过熔点金属表面要熔化,这是工艺规范不允许的。所以在实际应用中若激光器输出功率足够大,则尽量使扫

些异常现象:①原珠光体转变为马氏体,铁素体未发生相变,还是原来的硬度,马氏体呈岛状分布。②原珠光体区在加热过程中奥氏体化很不充分,有相当数量的残余碳化物没有溶入奥氏体,以致在淬火区还显示珠光体层片状痕迹。③激光淬火的热循环过程非常迅速。

4. 当含碳量小于0.3%时,原始晶粒度对激光淬火硬化有很大影响,只有当晶粒度小于7级时,才能获得理想的淬火效果。

### 参 考 文 献

- [1] 《激光热处理译文集》,湖南省机械局技术情报中心站,1980。
- [2] 《激光热处理专题译文集》,北京市机电研究院,1980,8。
- [3] 《钢铁热处理》编写组;《钢铁热处理-原理及应用》,上海科技出版社。
- [4] 河北工学院主编;《金属学与热处理》,机械工业出版社,1980。
- [5] 铁道科学研究院金属和化学研究所实验室编;《激光热处理》,国防工业出版社,1978,11。
- [6] John F. Ready; "Industrial Applications of Lasers", New York, Academic Pr., 1978。
- [7] "Application of Lasers in Material Processing", Ed. by E. A. Metzbow, 1979。

描速度快些。

在实验过程中曾得到陆显洁、孙传香、方慧英、杨开廷、曾跃新、杨克等同志的帮助,致以谢意。

### 参 考 文 献

- [1] レーザハンドブック,朝仓书屋,1973年。
- [2] Ф. Ф. 沃道瓦托夫等;“激光在工艺中的应用”,机械工业出版社,1980年。
- [3] D. T. Swift-Hook, A. E. F. Gick; "Penetration Welding With Lasers", Welding Research Supplement, 1973, 4925。
- [4] Cline H. E., Anthon T. R.; *J. Appl. Phys.*, 1977, 48, No. 9, 3895。
- [5] 川澄博通;“机械と工具”,1977, 23, No. 3。
- [6] “合金钢手册”(上册)第一分册,冶金工业出版社,1972年。
- [7] 斯米尔诺夫;高等数学教程,二卷三分册, p 198~199。