

零件的 激光强化

[苏]B.C.柯瓦林科 等著
郭东仁 胡隆庆 译

665

国防工业出版社

内 容 简 介

本书叙述了用不同类型的激光器的脉冲辐射和连续辐射强化材料的工艺过程；介绍了所用设备的性能；分析了理解材料激光辐射强化机理所必需的激光作用过程和强化现象；阐明了实现激光强化过程的各种方案；并以某些零件和工具的局部强化和合金化为例说明了这种新工艺的实际应用。

本书供从事新工艺研究和应用的工程技术人员阅读，对机械制造和仪器制造专业的大学生和研究生也有参考价值。

УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ЛУЧОМ ЛАЗЕРА

В. С. Коваленко

ТЕХНИКА, 1981

*

零件的激光强化

〔苏〕В. С. 柯瓦林科 等著

郭东仁 胡隆庆 译

责任编辑：蒋 怡

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张5 107千字

1985年4月第一版 1985年4月第一次印刷 印数：0,001—3,950册

统一书号：15034·2756 定价：0.63元

前 言

近年来,激光加工工艺在工业中的应用越来越广泛。钟表红宝石、金刚石拉模、膜片和拉丝模的精密打孔,金属板切割,布料剪裁,脆性材料配料,电子器件尺寸修配,各种材料的焊接,旋转体的平衡,等等,这些只不过是激光所能完成的工作的一部分。采用激光加工工艺在大多数情况下都能提高劳动生产率,提高加工质量和加工精度,改善劳动条件,增长生产技能。

虽然激光加工工艺在实际应用中取得了巨大的成绩,可是直到最近还不曾有人用激光对材料进行局部强化,而这种工艺的可行性在研究激光器辐射与金属和合金相互作用现象的初期的工艺探索中就已得到证明^[12,25,33]。用激光强化材料,可能会改变机械零部件的某些设计原则,并可能给产品制造工艺带来根本性变化。利用这种强化方法可以改变零件各部分的性能,故可以用比较便宜的结构材料制造零件,还可以得到具有罕见的强度、耐磨性和耐蚀性的合金。

只要能研制出性能完善的各种型号的激光设备,就能够在广泛的领域里把这种可能的新工艺变为现实,实现工艺过程的完全自动化,把工艺过程纳入以新技术、自动化和计算机的综合利用为基础的整体高效率生产系统中去。

直到目前,文献上关于材料激光强化的报导还是非常零散的,没有一本书总结过对这种加工方法研究的结果,也没有一本书列出这种方法的工艺特点、实现的可能性和应用实例。

本书试图填补这个空白。作者们简要叙述了在不同规范下激光器辐射与物质相互作用的物理基础，列举了各种型号的激光器的结构特点和辐射特性，还讨论了一些其他特殊问题。本书特别注重于这种新技术的工艺问题和工业应用实例。书中叙述了用 CO_2 激光器连续光束强化材料的新的研究结果。

本书的基础是作者们在基辅工学院工具教研室激光加工工艺实验室积累的研究资料。此外，还利用了苏联和外国研究人员近年来发表的有关激光加工工艺技术的研究成果。作者们对基辅工学院激光加工工艺实验室和其他参加研究工作的单位的协作表示感谢。

目 录

第一章 材料激光强化的物理基础	1
一、激光与材料相互作用的过程及作用时发生的现象	1
二、激光辐射作用区材料金相组织的变化	9
三、用激光辐射实现材料合金化的可能性	23
第二章 激光强化用的设备	34
一、固体激光器	34
二、气体激光器	43
第三章 实现激光强化的方法	59
一、在被强化表面上获得各种形状激光束作用区的方法	59
二、球面透镜和圆柱形透镜成形激光束方法的分析	65
第四章 脉冲激光强化过程的工艺特点	80
一、激光强化规范对已处理表面质量性能的影响	80
二、对强化表面使用性能的评价	94
第五章 用 CO ₂ 激光器连续辐射强化材料	101
一、强化层形成的基本规律	101
二、处理规范对强化表面性能的影响	113
第六章 用激光强化机械零件和工具的实例	121
一、用脉冲辐射强化零件	121
二、用 CO ₂ 激光器连续辐射强化零件和实现合金化	132
附录	139
参考文献	150

第一章 材料激光强化的物理基础

一、激光与材料相互作用的过程及作用时发生的现象

激光加工时，激光与材料的相互作用可根据激光辐射作用的强度和持续时间分为下列几个阶段：把激光辐射引向材料，吸收光束并把光能传给固体，加热材料而不引起材料表面破坏，熔化材料，蒸发和冲洗掉破裂物，材料在激光作用后凝固。

这些过程的进展特点取决于被加工材料的性能：在辐射波长范围内表面的反射系数，导温系数，导热系数，熔化比热和蒸发比热，熔化温度和蒸发温度，材料密度，等等。

用不同类型的激光器进行加工时，应当注意到，材料的反射系数及所吸收的光能是取决于激光辐射的波长的：激光器辐射波长越短，金属的反射系数就越小，所吸收的光能就越多。由表 1 可知，大多数金属对波长为 10.6 微米的 CO₂ 激光器的辐射，吸收能力都很差。

为了提高激光加工效率，可以用人工方法降低金属表面的反射率，例如改变表面粗糙度、采用各种涂层等。研究还表明，经过激光辐射作用后，原来具有高反射率的材料，反射率会急剧下降，于是吸收光能的能力就提高了。

材料吸收光能的部位都在浅层内，可以用布格定律表示：

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

式中 $I(x)$ —— x 深度处的光强，

I_0 ——入射光强；

α ——金属吸收光的系数。

表 1 金属的反射系数与辐射波长的关系

波长 (μm)	工作介质	Au	Cu	Mo	Ag	Al	Cr	Fe	Ni
0.4880	氩	0.415	0.437	0.445	0.952	0.85	—	—	0.597
0.6943	红宝石	0.930	0.831	0.498	0.961	0.82	0.555	0.575	0.676
1.06	钕玻璃, 钕铝石, 榴石	0.981	0.901	0.582	0.964	0.733	0.570	0.650	0.741
10.6	CO_2	0.975	0.984	0.945	0.989	0.970	0.930	—	0.941

实际上，在可见光谱区和红外光谱区，大多数金属吸收光的深度都小于 $0.1\mu\text{m}$ 。因此，通常认为，材料吸收光的部位在表面上，光能向深处传递是受导热条件（电子、声子和辐射导热）限制的。一些研究人员的计算表明^{〔8〕}，在温度低于 10^5K 时，电子导热是主要的传热形式。

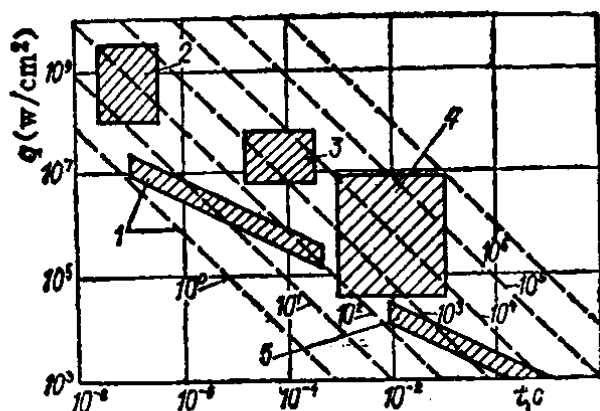


图 1 各种激光加工过程的能量特性

1—光泽处理；2—冲击强化；3—打孔；4—焊接
(小厚度熔透)；5—改变金相组织的强化。

材料加热的温度规范是由激光器辐射的功率密度决定的。低功率密度（约到 $10^3 \sim 10^4 \text{ W/cm}^2$ ）只能加热材料，不能使材料熔化和蒸发。功率密度提高到约 $10^6 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时材料开始熔化，提高到 $10^6 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ 以上时材料因蒸发而被破坏。

激光辐射在材料内引起的过程不仅与辐射的功率密度有关，而且还与辐射作用的时间有关。调节这两个辐射参数，可得到不同的能量条件，因而可进行焊接、打孔、改变金相组织的强化、激光光泽处理、激光冲击强化（图 1）等操作^[56]。图 1 上的虚线是一些固定比能（ J/cm^2 ）线。

确定激光作用区温度的变化规律，可利用表述半无限体上的热量扩散的微分方程^[42]：

$$\begin{aligned} \nabla^2 T(x, y, z, t) - (1/a) \partial T(x, y, z, t) / \partial t \\ = -A(x, y, z, t) / K \end{aligned} \quad (2)$$

式中 T ——温度，它是坐标 x, y, z 和时间 t 的函数；

a ——导温系数；

K ——导热系数；

A ——单位时间内单位体积所放出的热量，与坐标和时间有关。

只要能满足条件 $L^2/4at \gg 1$ ，这个方程对于有限尺寸 L 的固体也是适用的。

但是，作为坐标和时间的函数的温度，它的通用公式的显式却得不出来，也就是在相当于激光脉冲实际形状和实际空间强度分布的任意函数 $A(x, y, z, t)$ 下，都不能获得解析解。能推导出上述关系式的只是一些具体场合。其中最常见辐射空间分布形式是高斯型。对于这种形式，焦点处吸收能量的密度与焦点半径的关系按下式确定。

$$q(x) = q_0 \exp(-x^2/r^2) \quad (3)$$

式中 q_0 —— 焦点中心的辐射功率密度;

r —— 高斯光束的半径。

对于持续时间长的高斯型热源, 可按下式确定 t 时的温度:

$$T(x, z, t) = \frac{q_{\max} r^2}{k} \left(\frac{a}{\pi} \right)^{1/2} \times \int_0^t \frac{P(t-t') dt' \exp \left[\frac{z^2}{4at'} - \frac{x^2}{4at'} \right]}{\sqrt{t'} (4at' + r^2)} \quad (4)$$

式中 $q_{\max}$ —— 高斯焦点中心的最大辐射功率密度;

T —— 温度, 它是由表面算起的深度 z 、离热源中心的径向距离 x 和从热脉冲作用开始时算起的时间 t 的函数;

$$P(t) = q(t)/q_{\max}.$$

用关系式 (4) 计算激光辐射脉冲作用区的温度时应先作出下列假设: 材料的吸热系数非常大; 热量都释放在表面上; 材料的热物理性能与温度无关。此外, 计算时应只考虑实际脉冲的包线, 而忽略“峰值”。

关系式 (4) 可以计算受中等功率密度激光辐射作用的各种材料上的温度场。图 2 所示是激光辐射脉冲作用于铁时产生的温度场的一个例子。这个温度场是用电子计算机进行数字积分后得出的。图上以时间 t 对脉冲周期 τ 的函数形式示出了激光脉冲的典型形状 $P(t)$ 。最大振幅点 $P_{\max}$ 被规定为脉冲单位。

用激光辐射改变结构材料的局部性能时, 加在材料表面上的温度一般不应超过熔化温度或蒸发温度。对于给定持续

时间的激光脉冲，只要功率密度一定，即可按公式（4）确定把材料加热到组织转变所必需的温度或加热到熔化温度时的加热深度，不过事先应假设表面上光束中心的温度等于熔化温度 $T(x, z, t) = T(0, 0, t) = T_{\text{熔}}$ 或蒸发温度 $T(x, z, t) = T(0, 0, t) = T_{\text{蒸发}}$ 。

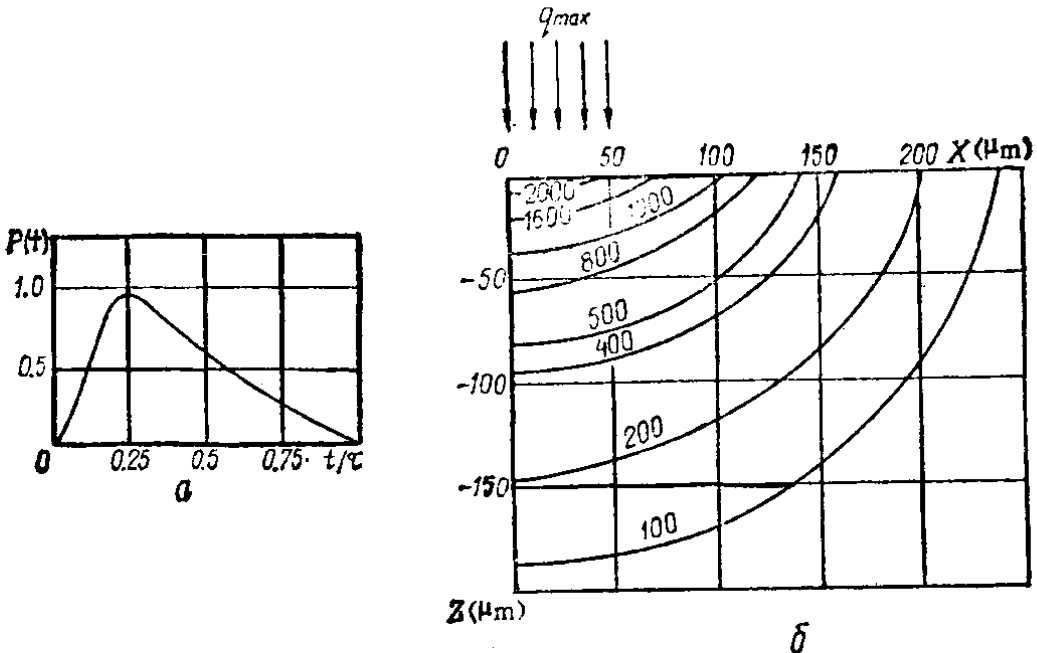


图 2 激光脉冲的形状 (a) 和铁上激光辐射作用区的温度场 (b)
 $a = 0.1\text{cm}^2/\text{s}$; $K = 0.3\text{W}/\text{cm}\cdot^\circ\text{C}$; $d = 0.01\text{cm}$; $\tau = 1 \times 10^3\text{s}$ 。

用连续激光辐射进行热处理时的温度关系式要复杂得多。这种情况下的热源，一般被认为是作用在半无限体表面上并沿 x 轴以速度 v 运动的热源。如果不考虑表面上的热损失，则表面坐标点 (x, y, z) 的温度在定常态下为^[50]

$$T = \frac{a}{4K(\pi a)^{3/2}} \int_0^\infty \frac{dt}{\sqrt{t^3}} \int_{-\infty}^\infty dx' \int_{-\infty}^\infty q(x', y') \times \exp\left[-\frac{(x-x'+vt)^2 + (y-y')^2 + z^2}{4at}\right] dy' \quad (5)$$

根据这个高斯分布关系式（图 3）可以推导出表征温度

分布的下述表达式:

$$\begin{aligned} \bar{T} = & \frac{16}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{(\bar{c}^2 + \bar{t}^2)(\bar{b}^2 + \bar{t}^2)}} \\ & \times \exp \left[-\frac{(2\bar{x}^2 + \bar{v}\bar{t})^2}{4(\bar{c}^2 + \bar{t}^2)} - \frac{\bar{y}^2}{\bar{b}^2 + \bar{t}^2} - \frac{\bar{z}^2}{\bar{t}^2} \right] d\bar{t} \end{aligned} \quad (6)$$

引入这个公式的无量纲参数如下:

$$\begin{aligned} \bar{T} = 16\sqrt{\pi} KrT/W A_0, \quad \bar{V} = Vr/2a, \quad \bar{x} = \frac{x}{r}, \\ \bar{y} = \frac{y}{r}, \quad \bar{z} = \frac{z}{r}, \quad \bar{c} = \frac{c}{r}, \quad \bar{b} = \frac{b}{r}, \quad r^2 = cb \end{aligned} \quad (7)$$

式中 A_0 ——被照射表面的反射率,

W ——激光辐射的功率。

如条件一定, 用公式 (6) 还可以确定强化区的深度。
例如 $T = 850^\circ\text{C}$ 、 $a = 0.7$ 时, 强化区的深度为

$$z \cong \frac{0.26 D_y}{\sqrt{v D_y + 0.413}} \ln \frac{0.0049 A_0 W}{D_y \sqrt{v D_y + 0.124}} \quad (8)$$

式中 D_y ——焦点在 y 轴上的位置。

上述关系式所表述的激光辐射作用区的温度状态, 其功率密度只能把材料加热或熔化, 而不能使材料蒸发或发生其他形式的破坏。能引起金属蒸发的激光器工作规范可用于打孔、切割和平衡等^[8, 25, 41]。

调Q运转激光器工作时, 激光辐射作用过程所产生的输出脉冲能在材料内形成冲击波, 于是发生激光冲击强化^[41, 59, 68]。

计算表明^[41], 在激光辐射下材料的被加热速度是非常高的, 每秒钟可达 $10^5 \sim 10^6^\circ\text{C}$ 。在极短的一瞬间即可把材料

表面层加热到很高的温度，使其熔化和过热。金属中的杂质在过热前如果呈相间状态，在过热状态下就会溶解。由于加热时间极短，熔化层厚度也很小，基体材料的受热程度又特别低，所以液态层结晶时的冷却速度就相当高，每秒钟可达 10^6°C 。这样的冷却速度约为一般淬火冷却速度的 10^3 倍。一般淬火能把合金的某种不平衡状态及相应的组织固定下来，而在高速冷却时，要形成这样的组织和相位，时间显然是不够的。因此冷却后所形成的状态，不是熔体还没有来得及分离成各相，就是熔体虽已分离，但还没有全部完成，如高速冷却时熔融铁形成 γ 相。这是因为碳没有来得及以渗碳体的形式析出，而停留在固溶体内或者部分地转变为体心立方晶格的 α 铁，最后形成马氏体。马氏体的含碳量可能比相当于马氏体相变点的一般含量高。

激光辐射作用能造成若干超级淬火区（白色层），这些淬火区具有其他高速加热方式（电子束加热、电火花作用、爆炸效应等）所具有的特征。这种白色层不易被一般腐蚀剂侵蚀，表面硬度高，亚组织晶粒细，而且含有耐高温相。

对 X 光照片的研究表明，激光辐射作用区亚组织的变化在许多方面都和淬火时或塑性变形时发生的变化相类似。通常，这个区的亚组织的晶粒是非常细碎的，而且显微畸变大，位错密度高^[25,88]。可以利用电子显微镜分析法来检查激光辐射区的位错组织和了解位错组织变化的客观特性。在功率密度为 $1.6 \times 10^4 \text{W/cm}^2$ 、持续时间为 $1.2 \mu\text{s}$ 的激光脉冲作用下，碳钢铁箔的位错密度可以达到 10^9cm^{-2} 。观察到的位错有单个的，也有交错排列的，这证明它们是相互有作用的。类似的位错组织在淬火铁^[25]中也有。随着辐射功率密度的增加（到 $2.7 \times 10^4 \text{W/cm}^2$ 时），平均位错密度也增加（到

10^{10}cm^{-2} 以上), 而且还会形成位错网状组织。进一步提高功率密度 (到 $8 \times 10^4 \text{W}/\text{cm}^2$, 即相当于熔化材料的功率密度) 时, 材料就会产生晶格位错组织, 晶格边界上的位错密度可达到 $10^{11} \sim 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 。这种组织是发生过强烈变形的金属特有的。在位于熔融材料和基本材料之间的过渡区里, 位错密度约为 10^9cm^{-2} 。

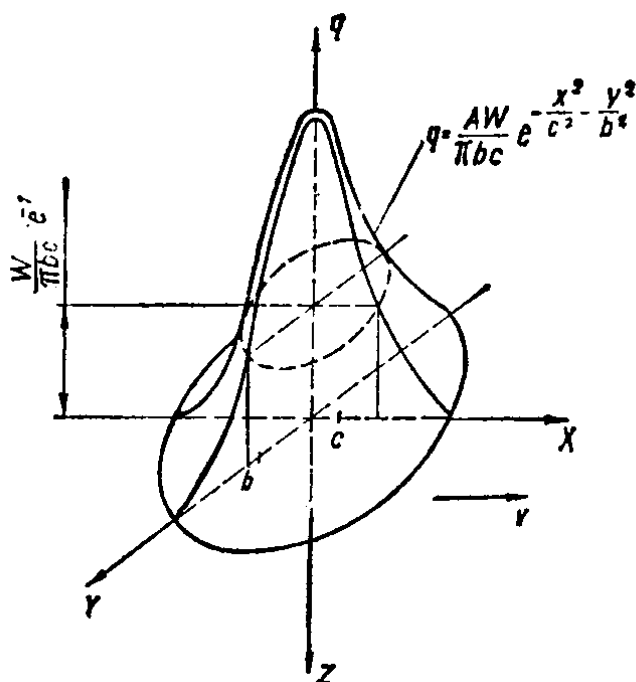


图3 激光束中光辐射强度的分布

1—20号钢; 2—45号钢; 3—Y8钢;
4—Y10钢; 5—Y12钢。

位错密度的提高显然是由于产生热应力的缘故, 而热应力的产生又是由于同时存在的各相比容和线膨胀系数的不同所致。因材料从表面蒸发而形成的输出脉冲, 也会引起位错密度的额外增加。关于激光辐射作用区位错组织变化的上述数据, 在一定程度上说明了材料发生强化效应的机理。

激光辐射作用使熔体过热时, 元素在材料

中的最大溶解度升高, 而快速冷却过程能把这种高温状态固定下来。这就给我们提供了获得溶解元素含量高的合金的可能性, 也就是利用激光辐射可增加材料局部表面上各种合金元素的含量。

如果热处理过程中使用的扫描激光束相对于被加工表面的移动速度非常高, 那么, 材料就只能在厚度只有几微米或

几十微米的极薄的表面层上发生熔化。在这种高速强化（光泽处理）^[56]过程中，淬火速度可以达到 $10^8^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。结果在这一薄层材料内所形成的实际上是一种具有许多独特性能的无定形系统，故可以改善材料表面的使用性能。

二、激光辐射作用区材料金相组织的变化

在自由振荡状态下工作的固体脉冲激光器的辐射作用能在被加工材料上造成一个热影响区，而且正如本书作者^[18]及其他一些人^[12, 88, 85]的研究所表明的，这个区所发生的相变和组织变化，在许多情况下都能大大提高材料的显微硬度（与原始组织的显微硬度相比）。但也有一些材料恰恰相反，其显微硬度是下降的。

要制定用激光辐射改变结构材料局部性能的工艺过程，必须有材料性能和加工规范对激光辐射作用区的尺寸和这个区显微硬度的变化特性的研究结果。为此，我们研究了碳钢、合金钢、有色金属及其合金在自由振荡激光器和调Q运转激光器的辐射作用下组织的变化。

1. 在自由振荡激光器的辐射作用下材料组织的变化

1) 碳钢

研究材料在激光辐射作用下的相变和组织变化，利用碳钢是最适宜的，因为对于碳钢在各种热处理条件下的情况都已进行过充分研究，而且利用碳钢研究含碳量对激光热影响区特性的影响也比较方便。研究这个问题的试样是用含碳量为 0.2~1.2% 的各种碳钢（20 号钢，Y8 钢，Y10 钢，Y12 钢）制备的。

研究结果表明，这几种钢的热影响区都是由两层组成的。第一层是一个不易被侵蚀的亮带（白色层），这种亮带在用其

他高速局部加热方式（电子束加热、电火花加热等）加热时也可观察到。某些研究者^[4]提出了一种假设，认为生成不易被侵蚀的白色层的原因之一是空气中的氮在高温条件下在钢的表面层内达到了饱和。这种白色层的显微硬度比原始组织的高得多。

第二层是高显微硬度层到原始组织的过渡区。这一层的显微硬度比第一层的低得多，但比原始组织的显微硬度高。

在相同热处理规范下，这二层的尺寸和显微硬度取决于碳钢的含碳量。随着钢的含碳量的增加，激光热影响区的显微硬度也显著提高（图4）。例如具有铁素体和珠光体组织的20号低碳亚共析钢，在 $E=2.06\text{ J}$ 、 $\tau=1.5\text{ ms}$ 、 $F=43.2\text{ mm}$ 时，激光热影响区第一层的显微硬度为 $750\sim 770\text{ kg/mm}^2$ ，而20号渗碳钢在一般淬火情况下的显微硬度为 $300\sim 350\text{ kg/mm}^2$ 。热影响区第一层的硬度高，证明这一层在激光作用后的冷却过程中发生了马氏体转变，就是说，不易被侵蚀的亮带是一种低碳细晶分散马氏体。这一层的加热温度由钢的熔化温度变成了 A_{c3} 点。

第二层为铁素体和马氏体。马氏体是在原来的珠光体晶粒处形成的。亚共析钢淬火不充分时常出现这种组织。保留在第二层中的铁素体晶粒的显微硬度为 $270\sim 300\text{ kg/cm}^2$ ，而钢的原始组织的显微硬度为 $170\sim 180\text{ kg/mm}^2$ 。铁素体晶粒硬度的提高，是因为铁素体结块边界上的

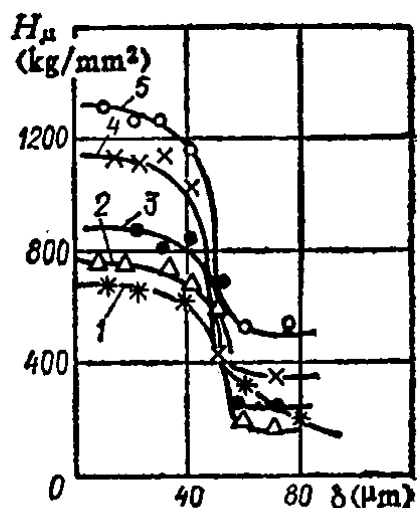


图4 显微硬度在激光加热区深度方向上的分布与钢的含碳量的关系

含碳量较高，因此在激光作用下奥氏体首先在结块边界上形成。冷却时在这些部位又形成马氏体，于是铁素体晶粒的硬度就提高了。

在研究过的各种碳钢中，Y12钢（1.2% C）的热影响区第一层是显微硬度最高的（到 1350kg/mm^2 ）。这一层由马氏体晶粒组成。在第二层的珠光体晶粒部位上生成的是马氏体，但仍保留着珠光体晶粒的形状。在第二层中，这种钢的残余奥氏体夹层比Y10钢试样的厚。这是因为Y12钢的含碳量较高，因此它的次生渗碳体网状组织就比Y10钢的厚，在这种网状组织部位上生成的奥氏体夹层也比较厚。在第二层中，离开第一层的距离越远，显微硬度就越小，到原始组织边界上时为 650kg/mm^2 。

研究中没有发现碳钢的含碳量对热影响区尺寸产生影响。在相同热处理规范下，所研究的各试样的热影响区尺寸都大致相等（ $60\sim 70\mu\text{m}$ ）。

提高碳钢的含碳量，热影响区的显微硬度会显著提高。显然这是由于钢经过高速加热和高速冷却后内部产生了热应力和组织应力的缘故。热应力引起的强化，对各种钢来说，大致是相同的，组织应力却不同，它所引起的强化是随着钢的含碳量的增加而增加的。因此可以认为，在激光辐射作用和快速冷却条件下能够获得相当值的组织应力，是钢强化的主要原因。

2) 合金钢

用P18、P6M5、XBΓ和ЛЛХ15等四种牌号的钢研究了激光辐射作用所引起的相变和组织变化。

P18钢。对试样显微组织的研究和显微硬度的测量表明，激光辐射作用的热影响区由三层组成^[29]。在研究过程所采用

的规范下, 宽度到 $200\mu\text{m}$ 的第一层位于试样表面上。这一层的组织为马氏体和奥氏体。这一层中没有碳化物, 因为在钢的熔化过程中碳化物都溶解了。这个区的加热温度不仅超过了钢的临界点, 而且也超过了钢的熔化温度。在宽度为 $70\sim 100\mu\text{m}$ 的第二层内保留有大量的未溶解碳化物。这一层的最高加热温度比第一层的低, 不超过钢的上临界点(熔点)。在第三层内发生了补充高速回火。这一层的宽度约为 $80\sim 150\mu\text{m}$ 。在激光加热过程中, 这一层的加热温度超过了钢的预回火温度 ($550\sim 560^\circ\text{C}$), 但不超过钢的下临界点 A_{c1} 。

就研究过的各个试样来看, 显微硬度的分布特征, 在激光加热区深度方向上大体是相同的。

显微硬度测量表明 (图 5), 原始组织的显微硬度为 $750\sim 850\text{kg/mm}^2$, 而第一层的显微硬度却降低到了 $500\sim 600\text{kg/mm}^2$ (曲线 1)。看来, 第一层显微硬度的下降与激光加热时生成合金含量高的奥氏体有关, 在快速冷却后, 大量的这种奥氏体被保留了下来。

应当指出, 在一般淬火后, 高速钢内的残余奥氏体含量不超过 $25\sim 30\%$, 金相组织中碳化物含量为其总量的 25% 左右。如用激光加热, 第一层内就不含碳化物, 而残余奥氏体

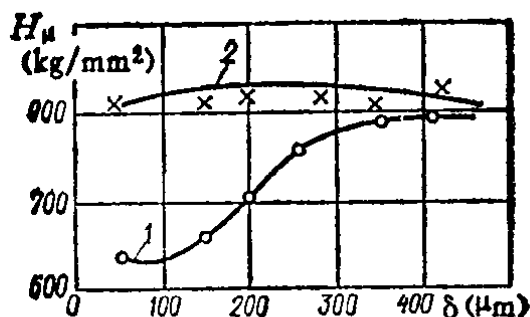


图 5 P 18 钢激光辐射作用区的显微硬度

1—热处理前; 2—热处理后。