

# 激光热处理的工艺与机理探讨<sup>\*</sup>

吴旭峰 张文珍 郭亨群

(华侨大学电气技术系, 泉州 362011)

**摘要** 实验中经激光热处理的缸套表面硬度可达 HV 800~1 000, 使用寿命提高 2 倍以上. 文中探讨了工艺条件, 初步分析了激光热处理的硬化机理, 认为晶粒细化、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.

**关键词** 激光热处理, 工艺, 硬化机理

**分类号** TN 249; TG 15

自从激光问世以来, 激光束所表现出的优良特性受到材料工作者的重视<sup>[1,2]</sup>. 它可以将高度集中的能量, 按所需的位置和时间, 以预定的量值, 准确地投射到材料上, 激光加工是其中一项相当有价值的应用. 激光热处理是激光加工领域中的重要组成部分, 它是以高能量激光束迅速扫描工件, 在其表面极薄的一层小区域内快速吸收能量而使温度上升, 达到相变温度, 利用工件基体的热传导实现自冷淬火, 实现表面相变硬化, 所以也称激光淬火. 它具有较常规淬火更优越的特点——加工速度快, 工艺周期短, 生产效率高, 易实现计算机控制; 可进行大型零件局部表面及复杂零件和槽、孔、洞等特殊部位处理; 变形小, 一般无需再加工; 硬度高, 耐磨性好; 无需淬火介质等. 但其加工硬化层较薄, 一般小于 1 mm, 另外设备较昂贵是它的主要缺点. 本文叙述了用激光对硼铬合金铸铁的缸套进行表面热处理研究, 对激光表面热处理的机理进行了初步的探讨.

## 1 实验过程

我们对 212 型汽车缸套进行激光内表面热处理, 它的材料为硼铬合金铸铁, 含碳量在 2% 以上. 未处理前, 表面硬度为 HV 500~600, 但耐磨性较差. 我们用 2 kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器进行热处理实验, 输出的激光波长为 10.6  $\mu\text{m}$ , 经导光系统后照射到工件表面. 以一个步进电机带动缸套转动, 另一个步进电机带动导光头上下移动. 用计算机编程控制两个步进电机的运动, 使激光束在缸套内壁扫出一个网状轨迹, 形成网状硬化带, 实验简图见附图. 考虑到金属对 10.6  $\mu\text{m}$  红外光的吸收率较低(一般仅为 15%), 在处理前喷涂上一层石墨涂层, 以增大吸收率. 我们用不同激光功率和扫描速度进行了实验, 实验用的功率为 500~1 000 W, 扫描速度在 0.01~0.08  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  范围内. 激光器输出多模激光, 形状近似为矩形, 经聚焦到工件表面时光斑尺寸 2 mm  $\times$  2 mm. 实验发现, 当所用光功率太大(大于 750 W)、而扫速又太小(小于

$0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 时, 金属表层出现熔化, 硬度得不到提高; 而功率太小(小于  $450 \text{ W}$ )、扫速太大(大于  $0.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 时, 表面达不到相变温度也没有达到提高硬度的效果. 对所试验的材料, 合适的工艺参数为激光功率在  $500 \sim 700 \text{ W}$ , 扫描速度在  $0.03 \sim 0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  范围内. 当所加功率为  $600 \text{ W}$ , 扫描速度为  $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 处理后的硬化带硬度可达  $\text{HV}800$  以上, 耐磨性大大提高, 经装车试验, 使用寿命提高 2 倍以上.

## 2 激光热处理的工艺机理分析

激光淬火是用高能激光束, 使金属材料在超快加热和急冷条件下发生相变, 这决定了它与其它热处理方式不同的机理和结果.

激光热处理时, 激光只是作为一个大的热源应用. 激光与金属间的热传递是通过逆韧致辐射效应实现的. 当激光束的光子与表层金属中的自由电子碰撞时, 金属导带电子能级提高, 并将吸收的热量转化为晶格热振动, 使表层金属温度升高, 形成一热层. 由于电子平均自由时间极短( $10^{-13} \text{ s}$ )<sup>[6]</sup>, 这种热转换与热平衡的建立非常迅速. 理论上讲, 金属表面在激光作用下可在微秒甚至更短的时间内达到相变温度, 甚至熔化温度. 金属表层形成的热层, 继而通过热传导作用成为内部金属热处理的热源.

### 2.1 激光加工的温度场方程

激光热处理实际上是激光与加工件之间热传导并引起加工件内部组织的相变. 激光作为一个有限大的热源, 可采用经典热力学方法简化其数学模型. 激光能量被材料吸收转化为热能, 我们可以把一般的热传导方程用于解决激光加热温度场的基本方程

$$\nabla^2 T - \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{q_0}{k} = 0, \quad (1)$$

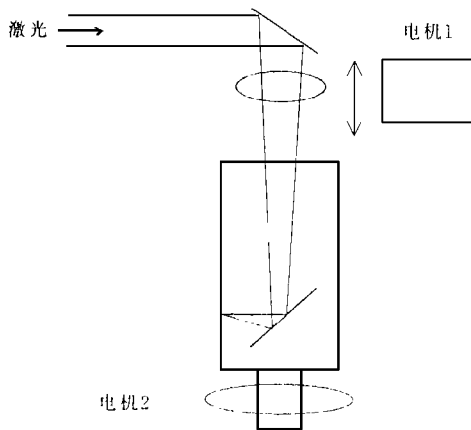
式中  $T$  为温度,  $t$  为时间,  $\alpha$  为热扩散系数,  $k$  为热导率,  $q_0$  为激光产生的热功率密度. 当加热区横向尺寸远大于其加热深度时, 可近似按一维热传导求解. 设  $z$  为深度, 则方程(1)转化为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{q_0}{k} = 0. \quad (2)$$

若激光功率密度在时间上恒定不变和空间分布均匀, 利用初始条件和边界条件, 则可求得加热时温度分布为<sup>[6]</sup>

$$T(z, t) = \frac{2q_0(\alpha t)^{1/2}}{k} \cdot \text{ierfc}\left[\frac{z}{2(\alpha t)^{1/2}}\right], \quad (3)$$

式中  $\text{ierfc}$  为互补误差函数. 当  $z$  远大于  $4(\alpha t)^{1/2}$  (称为热穿透深度) 时, 互补误差函数接近于零. 可见, 加热时间短, 温度升高仅限于工件表面附近而不会提高材料的整体温度, 这是激光热处理的一大特点. 在激光热处理时, 我们可以调整激光加工参数. 在我们的实验条件下, 激光功率应控制在  $500 \sim 1000 \text{ W}$  之间, 以保证加热时材料内最高温度低于熔点. 同时, 一定的区域要达到奥氏体化温度以保证相变的完成. 由式(3)可以看出, 工件内的温度分布与激光功率



附图 激光热处理示意图

密度、加热时间、热导率和热扩散系数有关。所以在热处理时, 要根据材料的不同, 保证一定的功率密度和加热时间, 使得到满足要求的硬化层硬度和深度。当激光扫过之后, 被加工金属通过基体冷却时, 可以求得温度分布<sup>[6]</sup>为

$$T(z, t) = \frac{2q_0\alpha^{1/2}}{k} \left\{ t^{1/2} \cdot \operatorname{ierfc} \left[ \frac{z}{2(\alpha t)^{1/2}} \right] - (t - t_1)^{1/2} \cdot \operatorname{ierfc} \left[ \frac{z}{2[\alpha(t - t_1)]^{1/2}} \right] \right\}, \quad (4)$$

其中  $t_1$  为激光关断时刻, 即激光在金属单元上加热时间为  $t_1$ 。根据此式可以调整加工参数, 保证快速冷却, 达到和高于马氏体化的临界冷速。在我们的实验中, 激光热处理硼铬合金铸铁时, 采用激光功率 600 W, 相应的扫描速度为  $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 可得到较好的结果。

一般讲, 激光热处理工艺参数之一是指在一定范围内的高功率激光快速扫描。实际工作中, 因快速加热而使  $A_1$  点向高温区产生位移, 位移量在  $100^\circ\text{C}$  左右<sup>[6]</sup>, 所以用温度场确定工艺参数和求硬化层深只能是近似的。人们根据激光加工的实践得到层深正比于  $P / \sqrt{D \cdot v}$ ,  $P$  为激光功率,  $D$  为光斑大小,  $v$  为扫描速度。这与我们的实验结果是符合的。当然, 硬化层特性还与材料本身的另外一些性质有关, 如材料的相变温度、材料本身的组织成分等。

## 2.2 激光相变硬化机理

从物理冶金角度, 激光相变硬化与常规热处理并无两样, 只不过是前者为局部的急热急冷过程。由于加热时间短, 热影响区域小, 硬化层较浅, 一般只有  $0.3 \sim 1.0 \text{ mm}$ 。这对于要求变形小, 形状复杂和要求局部处理的零件来说较为合适。由于加热速度快, 表面升温速度可达  $10^5 \sim 10^6 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ , 使材料表面迅速达到奥氏体化温度。原有材料中珠光体组织通过无扩散转化为奥氏体组织, 在随后通过自身热传递而快速冷却 ( $10^4 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 奥氏体组织通过无扩散过程转化为马氏体。同时组织细化, 这是由于激光超快加热条件下, 过热度大, 造成相变驱动力 ( $\Delta G^{\alpha-\gamma}$ ) 很大, 奥氏体形核数目剧增。它既可在原晶界和亚晶界成核, 也可在相界面和其它晶体缺陷处成核, 而在快速加热下的瞬间奥氏体化使晶粒来不及长大。在马氏体转变时, 必然转变为细小的马氏体组织。另一方面, 激光快速加热, 使得扩散均匀化来不及进行, 奥氏体内碳及合金浓度不均匀性增大, 奥氏体中含碳量相似的微观区域变小, 随后的快速冷却时, 不同的微观区域内马氏体形成温度有很大的差异, 这也导致了细小马氏体组织的形成。研究表明, 激光相变硬化处理后可获得直径为  $2 \mu\text{m}$  的超细晶粒<sup>[7]</sup>。激光处理加热速度快, 易使金属表面过热, 随后冷速亦快, 残留奥氏体量增加, 碳来不及扩散, 使得奥氏体中碳量增加, 随着奥氏体向马氏体转变, 得到高碳马氏体, 提高了硬度。而激光处理后的马氏体组织为板条马氏体和孪晶马氏体组织, 其中位错密度极高, 可达  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$ <sup>[8]</sup>。这对高硬度的获得也作出贡献。许多研究工作表明, 晶粒细化、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。这些都是我们实验中经过激光热处理获得较高表面硬度的主要原因。

## 3 结论

实验中, 我们对缸套硼铬合金铸铁进行激光热处理, 选用合适的加工工艺参数, 可以得到 HV800 以上的表面硬度。激光热处理工艺参数的选择对硬化层特性有很大的影响, 为得到理想的热处理效果, 应该根据材料的不同选用不同的工艺参数。研究表明, 晶粒细化、马氏体高

的位错密度和固溶含碳量是获得超高硬度的主要原因.

## 参 考 文 献

- 1 王卫乡,刘颂豪,张 有等.CO<sub>2</sub>激光 CVD 制备纳米硅粉.激光与红外,1995,25(2):27~31
- 2 刘 斌,徐金瑞,林建明等.激光应用于玻碳电极表面的预处理.华侨大学学报(自然科学版),1996,17(4):362~364
- 3 姚善长.激光表面相变硬化.金属热处理,1987,(114):39~41
- 4 王家金.激光加工技术.北京:中国计量出版社,1992.136~155
- 5 Victor G G. Laser heat treatment. In: Bass M, eds. Laser Material Processing. New York: North Holland Published Company, 1983. 203~233
- 6 杨端成,王焕琴,张尔岱等.表面激光快速相变的硬化层特征.金属热处理学报,1988,9(2):22~28
- 7 刘 宁,卞承艺,施家山.W6Mo5Cr4V2 钢激光相变硬化及强化效应的估算.金属热处理学报,1993,14(1):31~36
- 8 刘江龙,邹至荣.激光相变硬化机理.金属热处理学报,1988,9(1):64~70

## Technology and Mechanism of Laser Heat Treatment

Wu Xufeng Zhang Wenzhen Guo Hengqun

(Dept. of Elec. Tech., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** In experiment, a cylinder sleeve shows a surface hardness up to HV800~1000 and a service life over two-fold after laser heat treatment. A study is made on its technology and condition and an initial analysis is given to the mechanism of hardening. The authors believe that the ultrahigh hardness is chiefly due to the pulverization of crystal grains, the high-lying dislocation density of martensites, and the content of carbon in solid solution.

**Keywords** laser heat treatment, technology, mechanism of hardness