

## 在60钢表面激光渗硼及其机理的探讨

张思玉 郑克全 高锦英 魏 稼

(兰州大学物理系)

本文叙述了用一台输出功率为2kW的横流CO<sub>2</sub>激光器在60钢表面涂敷B<sub>4</sub>C粉末的试件上进行激光渗硼的实验研究,对激光渗硼的表面所作的组织和能谱等分析表明,激光能够在60钢表面渗硼,使它具有优异表面特性,同时对渗硼的机理作了初步的探讨。

Study on laser boronizing of the 60 steel surface and their mechanism

Zhang Siyu, Zheng Kequan, Gao Jingying, Wei Jia

(Department of Physics, Lanzhou University)

## Abstract

In this paper, the experimental procedure are presented for boronizing in the 60 steel surface using 2kW transverse-flow CO<sub>2</sub> laser. The surfaces of these samples have been coated with B<sub>4</sub>C powder. Micro-structural and energy spectrum analysis of the laser boronizing surfaces indicate that laser boronizing in the 60 steel surface is possible so that it has the desired high quality surface properties. A preliminary discussion of the strengthening mechanism of the laser boronizing layer has been presented.

---

[4] 张思玉等,《激光与红外》,1985年,第8期,第28页。

作者简介:郑克全,男,1935年出生。副教授。现从事激光器件、激光技术及应用方面的科研和教学工作。

张思玉,女,1938年出生。副教授。现从事激光器件、激光技术应用方面的科研和教学工作。

高锦英,女,1947年出生。讲师。现从事激光技术及应用方面的研究工作。

---

收稿日期:1987年10月20日。

## 引 言

随着高功率CO<sub>2</sub>激光的发展,激光应用于材料加工和热处理得到了迅速的发展,激光对金属材料表面改性是近十年发展起来的新技术,其突出的优点是既可以保留基体材料的固有特性,又可获得用常规方法无法得到独特的性能的表面,因此,这个研究领域无论在国外还是国内都引起了广泛重视和兴趣,激光相变硬化,现已从实验室研究进入实际生产应用,已发挥了很大的经济效益,激光包覆,埋嵌,晶粒细化以及合金化国内外都作了不少的研究[1~3],都取得了很大进展,显示出了激光改性的优越性。目前用激光对轻元素(C、N、B)的合金化,如渗碳、渗氮、渗硼以及两种以上元素共渗的研究尚未见到这方面的研究报导。近年来我们在这方面开展了系统的实验研究工作,实验结果表明,激光渗碳、渗氮、渗硼以及两种以上元素共渗是一种较为理想的方法,它的优点是既能得到优异性能的表面,又使得激光处理周期短,消耗能源少,耗损材料少,工件变形小,不需要淬火介质,无公害,较容易实现机械化和自动化处理,本文仅介绍用CO<sub>2</sub>激光束在60钢表面渗硼的实验研究和机理的初步探讨。

### 一、实验条件和方法

激光渗硼实验采用了一台JL-6型横流CO<sub>2</sub>激光器,其输出功率为500~2000W连续可调,激光束用焦距为250mm的碲化镓透镜聚焦,辐照光斑尺寸为3mm,激光功率为1500W,扫描速度为2mm/s、3mm/s、4mm/s三种。

实验试块选用60钢作基体材料,并加工成20×20×6mm的金属块,经机械加工后的基体进行了表面研磨,清洁处理,除去油脂和污物待用。

渗入材料为B<sub>4</sub>C粉末,经研磨后粒度小于300目,将粉末用无机粘合剂调合成粉浆,均匀的涂敷在基体表面上,涂层厚度约为0.15mm,由于粉末材料对10.6μm的激光束具有较强的吸收能力,因此在涂层表面无需再加入能量吸收剂。

### 二、实验结果和分析

用光学金相显微镜和扫描电镜对处理后的样品进行了组织观察,结果表明,经激光处理后的试样,其组织明显地分为三个不同区域,即激光渗硼区,激光熔化热影响区(相变区)和基体,图1a为60钢基体显微组织。白色部分为珠光体组织,黑色部分为铁素体组织。图1b为激光熔化热影响的显微组织。这是在激光加热表面熔化时吸收大量激光能量,在基体传送热量过程中,使基体的温度升高到奥氏体化的温度,这个区域就发生相变,结果使得这个区域转变成板条状马氏体(或淬火马氏体)组织,图1c、c'、c"为三种不同扫描速度的渗硼层的显微组织照片,由于表面在熔化过程中渗入了大量的硼元素,在凝固时,渗层中含有FeB和Fe<sub>2</sub>B所组成的双相硼化物,其组织结构呈现出竹笋状胞晶组织。从图1c、c'、c"三张照片相比较就可以得出以下的结果,在相同的激光功率和相同涂层厚度的情况下,扫描速度慢,熔化深度较深,扫描速度越快,而晶粒度就越细。

渗入元素在渗层中的分布是研究合金化很重要的问题之一,在实验时采用了一台PHI595高精度多功能俄歇能谱仪测定了样品熔化层硼和碳元素分布规律,图2是样品由表向内的俄

歌线扫描图谱，实验结果表明，硼和碳元素的图谱起伏很小，这说明硼和碳元素在渗层分布

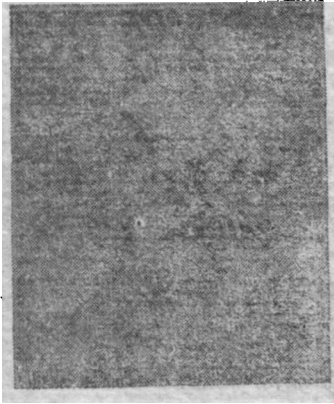


图1a 60钢基体显微组织, ×1500

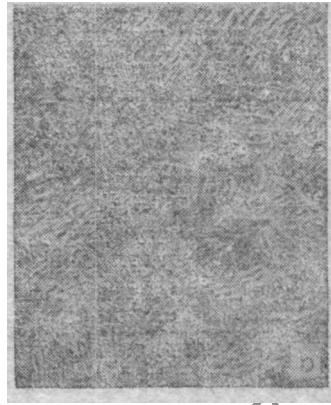
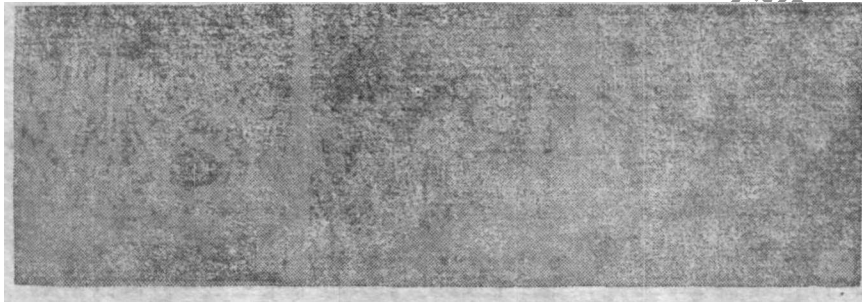


图1b 热影响区的显微组织, ×1500



c. 扫描速度2mm/s 渗硼层显微组织 ×1000  
 c'. 扫描速度3mm/s 渗硼层显微组织 ×1000  
 c''. 扫描速度4mm/s 渗硼层显微组织 ×1000

图1c, c', c'' 渗硼显微组织

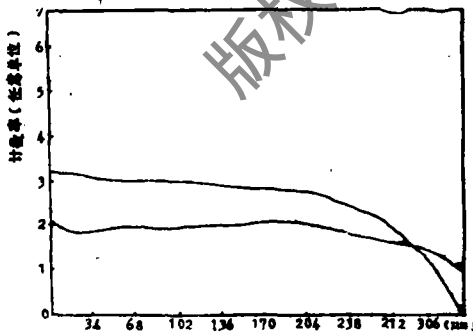


图2 在渗层中, 硼和碳元素俄歇线扫描图谱

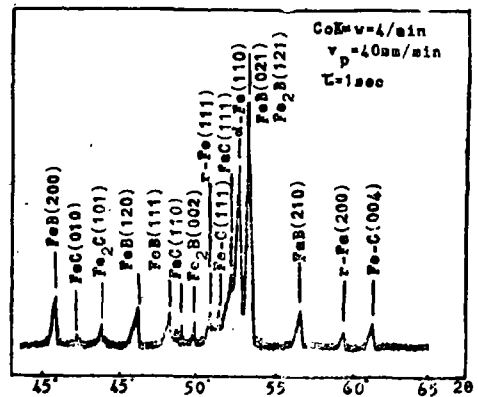


图3 对渗层X射线衍射图谱

是均匀的，实验还表明，表面涂敷B<sub>2</sub>C粉末，有四个硼元素一个碳元素，硼的图谱高于碳元

素的图谱，渗入渗层中元素的多少与添加在涂层上的元素含量成一定的比例关系。

图3示出扫描速度为2mm/s渗硼层X射线衍射图谱。从图谱分析表明，在渗层存在 $\alpha$ -Fe和 $\gamma$ -Fe物相以外，渗入硼和碳元素，它们与铁元素生成 $Fe_3B$ 、 $Fe_2B$ 、 $Fe_3C$ 、 $FeC$ 等物相，这些物相的存在，无疑对熔化层的强化起到极其重要的作用。

图4示出了在给定涂层厚度和相同激光功率的情况下，不同扫描速度的渗硼层的显微硬度分布。从图中看出，对一定的涂层厚度(0.15mm)和相同的激光功率密度的条件下，显微硬度值沿深度成双台阶形分布，第一台阶为渗硼层区域的硬度值，第二台阶为相变区的硬度值，下部为基体硬度，从曲线分布还可以看出，扫描速度快，渗硼层的硬度值稍有增大，相应地熔化深度较浅，实验还表明，当增大激光功率密度和降低扫描速度时，熔化区域的显微硬度值大幅度减小，这可能是表面熔化区过烧引起的。

### 三、激光渗硼机理初探

以上对激光渗硼后显微组织，渗入硼元素的分布，生成的物相以及显微硬度的分布进行了测试和分析。这里对激光渗入元素的机制作一些初步分析和讨论。激光对金属表面合金化处理就是在金属试件表面上涂敷，火焰喷涂、蒸镀或者沉积一薄层待合金化的添加元素，利用高能密度的激光束辐照涂有添加材料的表面，使表面的添加材料和待合金化基体材料(薄层)同时达到熔化程度，而熔化(或分解)材料的活性原子与熔化基体材料的活性原子同处于一熔池中，并处于剧烈的运动状态，这些原子在熔池中受到重力和表面张力作用就会相互扩散和混合，由于这些原子是在高温液体状态熔池扩散和混合，扩散系数比在固态中的扩散系数大得多，在极短时间内添加元素在熔化的基体就能达到均匀分布，添加元素均匀分布在合金层中这是经许多合金化实验结果所证实的事实。激光合金化是属于材料表面局部快速处理过程。激光加热的能量绝大部分储存在表面薄层内，这些热量主要由基体传走，表面冷却速度极快，使得合金层晶核未进一步长大之前，表面便凝固成固体，一般说来经激光处理后的金属表面都能得到晶粒度极小的组织。这也是为许多实验所证实的事实。

激光渗入金属基体中的元素有时以固溶体出现，有时形成金属间化合物，这取决于添加材料的选择和激光处理条件，在金属材料表面，利用激光可渗入金属元素如铬、铌、钒、钛等，渗入非金属如硼、氮、碳等，也可渗入化合物如 $B_4C$ 、 $TiC$ 和 $WC$ 等[4]。但无论添加何种物质，它们都具有熔化(或分解)、扩散和结晶三个基本过程。

熔化(或分解)，就是在待合金化基体表面涂有单质元素，需加热到熔化的程度，若涂敷是化合物则需加热到分解的程度，而有些化合物分解温度极高，如要使 $B_4C$ 分解需要2400℃以上，由于激光束能量高度集中，用激光束对金属表面穿透方程来说明，穿透方程如下式：

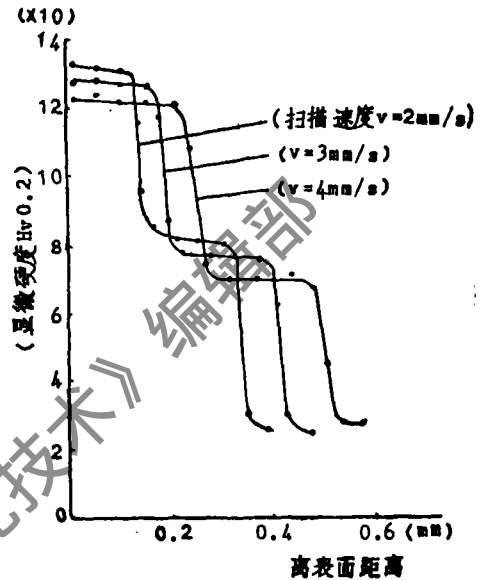


图4 硬度分布曲线

$$E(x) = E_0(1 - R)e^{-\alpha x} \quad (1)$$

式中,  $E(x)$  是激光对金属表面穿透深度为  $x$  的激光能量,  $E_0$  为入射到金属表面激光能量,  $R$  为金属表面对激光的反射率, 而  $\alpha$  为金属吸收系数, 当深度增加一小量  $\Delta x$  时, 储放能量为

$$\Delta E(x) = E_0(1 - R)\alpha e^{-\alpha x} \Delta x \quad (2)$$

因此从上式可看出, 表面储放能量最大, 并随深度增加而单调的减小, 根据激光加热金属材料时绝大部分能量集中在表面薄层的特点, 只要合金化过程选择合适的激光功率密度和扫描速度, 使任何材料表面达到熔化(或分解)是不难的。X-射线衍射物相分析表明, 渗层中出现有  $FeB$ 、 $Fe_2B$ 、 $FeC$  和  $Fe_3C$  等物相, 这说明在激光辐照下  $B, C$  已达到了分解的温度。

扩散, 就是在基体表面涂敷材料熔化(或分解)的活性元素向基体薄层熔化区深处的迁移过程, 以形成一定厚度的扩散层, 渗入的激活原子在重力和表面张力作用下由表面浓度高的一边移向浓度低的一边。并力求浓度趋向均匀分布, 在初始时, 渗层内各区域的浓度是随时间变化的, 并且渗入元素的扩散速度与金属表面处浓度有关, 如考虑上述因素对扩散的作用, 可用扩散定律表示, 在扩散系数  $D$  与浓度  $C$  无关时,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

式中,  $\frac{\partial C}{\partial t}$  是浓度变化速率,  $\frac{\partial C}{\partial x}$  是在  $x$  方向的浓度梯度,  $D$  是液体中扩散系数。

在实际使用时, 为了解上述扩散方程需要给出具体边界条件。若扩散初始时, 设表面处浓度为  $C_0$  是常数。并且  $D$  与浓度无关, 距表面为  $x$  处任意一点的浓度小于表面浓度  $C_0$ , 那么经过时间  $\tau$  扩散后, 扩散层深处某一点  $x$  处的浓度  $C(x, \tau)$  的变化, 将由下列方程确定,

$$C(x, \tau) = C_0 \left[ 1 - \varphi \left( \frac{x}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right] \quad (4)$$

式中,  $\varphi \left( \frac{x}{2\sqrt{D\tau}} \right)$  是高斯误差积分函数, 在扩散系数已知的情况下, 经过时间  $\tau$  扩散后, 渗入元素在层深为  $x$  处的浓度  $C(x, \tau)$  值便可以计算出来。同时考虑到扩散层的深度将随时间的增加而不断加深, 其加深的速度大致是遵守抛物线的规律, 即:

$$\delta^2 = k \cdot \tau \quad (5)$$

式中,  $\delta$  是扩散层的深度,  $\tau$  是扩散时间,  $k$  是常数。

再一方面考虑到温度对渗入元素扩散影响最大, 渗入元素加热温度越高, 其渗入速度也越大, 大致呈下列指数关系

$$\delta = A e^{-\alpha/T} \quad (6)$$

式中,  $\delta$  是渗层深度 (mm),  $A, \alpha$  是实验系数,  $T$  是绝对温度,  $e$  是自然对数的底。

而激光在金属表面渗入元素特点是要在表面涂敷的材料加热到熔化(或分解温度), 而基体待渗层也要达到熔化的程度, 而待渗激活元素具有较大动量而且又是在熔化的液态金属中扩散, 扩散速度很大, 而扩散深度一般  $0.4\text{mm}$  以内, 所以一般说来渗入  $x$  元素在极短时间内, 在熔化区域内达到均匀分布的程度。在许多合金化实验结果都得到了渗入元素在合金层中均匀分布的结论。

结晶(凝固), 就是液态金属结晶为固态金属的过程(也是冷却凝固过程), 在涂敷添加

材料的表面经激光加热熔化处理后移去激光束,表面储放绝大多数的能量由基体传走,使表面得到急剧冷却,由于合金化处理都要在表面加入各种元素,这些元素的加入就相当在熔化区加入了变质剂,变质剂的加入促进了熔化区的成核率,抑制晶粒长大,由于冷却速度极快,在晶粒未进一步长大之前,而熔化区已凝固成固态,如果再增大冷却速度,在表面熔化区还可得到非晶组织,以上渗硼机理三种过程对激光渗入元素合金化处理有普遍意义,对渗入金属元素同样适用。

### 参 考 文 献

- [1] 张思玉,《激光与红外》,1985年,第8期,第28页。
- [2] D.S.Gnanmuthu, Opt. Engng., 1980, Vol.19, No.5, P.783~792.
- [3] 张思玉等,《中国激光》,1986年,第13卷,第7期,第434~437页。
- [4] 《钢铁热处理》编写组,《钢铁热处理原理及应用》,上海科技出版社出版,1979年,第227~287页。

收稿日期:1987年10月20日。

· 简 讯 ·

## 我国万瓦级连续波CO<sub>2</sub>激光器通过国家鉴定

武汉华中工学院激光研究所研制的针板式万瓦级连续波CO<sub>2</sub>激光器,1988年1月14日在国家教委主持下通过技术鉴定,其指标已达到:平均输出功率10.467kW(多模),激光功率不稳定度 $\leq \pm 2\%$ ,连续运行时间6h(多模),激光器平均转换效率(注入电功率包括镇流电阻损耗在内) $\geq 12\%$ 。

来自全国有关高校、科研院所、工矿企业和计量单位的教授、专家组成鉴定委员会,听取了华中工学院激光研究所提出的技术报告,根据由专业技术人员和计量院代表组成的测试组实时测试结果,经过60多位到会代表现场参观和热烈讨论之后,对这项科研成果给予了高度的评价:

1.所鉴定的激光器系我国第一台激光输出功率破万瓦的最大的连续波CO<sub>2</sub>激光器,其性能及主要参数居国内领先地位,填补了国内空白。

2.华中工学院与北京有色金属研究总院协作,在砷化镓窗口材料、镀膜技术、光腔结构方面取得了突破性的进展,并成功地用于万瓦级连续波CO<sub>2</sub>激光器。

3.万瓦级连续波CO<sub>2</sub>激光器,全部采用国产材料,结构合理,效率高,输出稳定,运行良好,这标志着我国在研制万瓦级连续波CO<sub>2</sub>激光器方面已进入国际先进行列。

鉴定会上国家计委科技局、国家科委新技术局等有关领导也讲了话。

(郭振华 叶玉宏 供稿)