

激光渗碳渗硼及其机理的初探

郑克全 张思玉

(兰州大学物理系)

1987 年 6 月 29 日收到

本文叙述了用一台输出功率为 500—2000 W 的连续 CO₂ 激光器,在 20 钢表面上实现了渗碳、渗硼的实验方法,并对激光处理后的样品,从相的组成、形貌、硬度分布及耐磨性能等方面作了综合分析。实验结果表明:样品表面的化学成份、显微组织和机械性能发生了根本性转变。同时对激光处理过程的机理也作了初步的探讨。

一、引 言

自大功率激光器问世以来,人们以激光束作为热源,对金属材料表面处理以改善其表面性能进行了大量的实验研究^[1-4],并取得了可喜的成绩。与常规金属表面处理方法比较,这种新技术具有以下优点:靠基体自身冷却,不需要淬火介质,工件变形小;可对工件任何部位选区处理;加热、冷却速度极快,处理周期短,生产效率高,节省能源;清洁无污染,且较易实现自动化生产,可在金属表面形成具有优异的物理和化学性能的合金层,提高工件使用寿命,减少贵重合金元素的消耗量。另外,在这种处理中,被处理区以极快的冷却速度冷却,可抑制某些有害相的生成,形成无偏析组织,甚至非晶态组织,因而它显示了生成新型表面材料的极大潜力,为我们展示了一个新的快冷研究领域。因此,该技术自问世以来便受到高度重视。但目前用激光束对金属表面进行轻元素的合金化,如激光渗碳、渗氮、渗硼以及两种以上元素共渗,这方面的系统研究工作很少见到报道。近几年来,我们对这方面的工作作了系统的探讨。本文将报道我们用连续 CO₂ 激光器在 20 钢表面渗碳和碳硼共渗的一些工作。

二、实验条件和方法

在我们的实验中,采用了一台 JL-6 型横流 CO₂ 激光器,以激光束对准样品,由样品随工作台的移动实现激光扫描。当激光波长为一定时(对 CO₂ 激光,波长 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$),影响激光束与金属表面相互作用的主要参数为入射激光功率密度及激光与金属的相互作用时间。表面吸收的激光功率与作用时间的关系可从文献[5]中找到合适的处理条件。当光斑为圆形时入射到金属表面被其吸收的激光功率密度 F 可用下式表示:

$$F = \frac{4P}{\pi D^2} (1 - \tau). \quad (1)$$

式中 P 为激光器输出功率, D 为光斑直径, γ 为总的损耗(取 $\gamma \approx 0.3$), 在我们的实验中, 圆形光斑的直径约为 3 mm, 能量呈高斯分布, 经多次实验结果找出较为适宜的激光功率, 我们选取为 1450 W, 激光束的扫描速度为 7 mm/s, 根据 (1) 式计算结果, 被金属表面所吸收的激光功率密度约为 $1.44 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$.

光束与金属表面的相互作用时间可用

$$t = D/V \quad (2)$$

表示, 式中 D 为光斑直径, V 为激光束扫描速度, 在本实验中可知光束与金属表面相互作用时间 $t \approx 0.43 \text{ s}$.

实验样品选择 20 钢作为基体材料, 加工成 $20 \times 20 \times 6 \text{ mm}^3$ 的块状, 经机械加工后的基体进行了表面研磨和清洁处理.

合金化元素在渗碳实验中采用碳粉, 在碳硼共渗中采用碳化硼 (B_4C) 粉末和碳粉的混合物, 其重量比为 $\text{B}_4\text{C}:\text{C} = 2:1$, 将上述粉末添加合适的无机粘合剂将其均匀混合, 然后涂敷在基体材料表面上, 涂层厚度约为 0.15 mm. 因为粉末材料对 $10.6 \mu\text{m}$ 的激光束有较强的吸收能力, 因此在涂层内无需再加入能量吸收剂.

三、实验结果与讨论

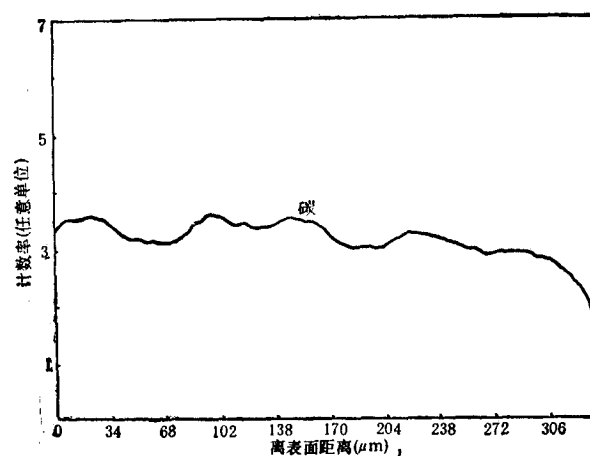
1. 合金层中渗入元素的分布

为了观察渗入元素在表面层中的分布情况, 我们采用 PHI-595 型多功能俄歇电子能谱仪, 对处理后的样品由表及里作了俄歇线扫描观察, 实验所得出的俄歇电子能谱图见图 1 (a)(b) 所示. 从图 1 中可以看出, 我们所添加的合金化元素均已渗入了基体表层, 渗入深度约为 $300 \mu\text{m}$, 同时还可以看出合金化元素在合金层中的分布基本上是均匀的. 关于合金化元素与表面熔化层能在极短时间内迅速混合均匀, 显然这与金属表层被熔化后渗入介质的激活原子的扩散过程有关. 在合金化过程中, 用肉眼可观察到沿激光束照射的表面有剧烈的液流, 这种宏观液流的存在也是元素在表层均匀化的原因. 这种宏观液流的产生我们认为与下述两个因素有关: 一是因为液体表层中心温度最高, 而液体与固体交界处温度最低, 即表层存在由中心指向边缘的辐射状温度梯度, 这种温度梯度将引起表面张力梯度, 从而引起液体由中心向边缘较冷处的横向流动. 同时, 激光束与金属表面上的大气作用, 形成等离子体, 此等离子体被加热并放大, 其压力使熔池表面下陷, 当光束前进时, 熔池也前进, 熔池前缘的液体将沿压陷向尾端纵向流动.

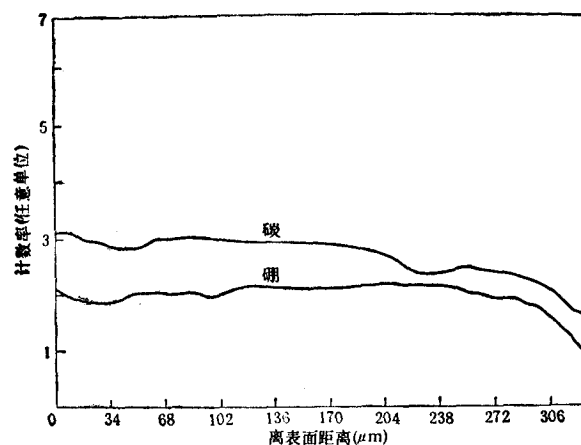
从图 1 (b) 中还可以看到, 合金层中所含合金化元素多少与添加元素含量有关, 在碳硼共渗试样中碳元素含量实际上是高于硼的.

2. 合金层的 X 射线物相分析

从上面俄歇扫描图谱中, 我们知道合金化元素确实已渗入到 20 钢表层, 为了弄清这些元素与基体材料之间以什么物相的形式结合而存在于合金层表面. 我们用 XD-3A 型 X 射线衍射仪对表面合金层的物相组成进行了分析. 结果分别示于图 2 (a), (b) 中. 在渗碳层中存在 $\alpha\text{-Fe}$, $\gamma\text{-Fe}$ 以及 FeC , Fe_2C 和 Fe_3C 等铁碳化合物, 见图 2 (a), 显然这是由于在 20 钢中渗入碳元素所致, 它的物相组成与基体材料是有区别的. 在碳硼共渗的合



(a) 渗碳层



(b) 碳硼共渗层

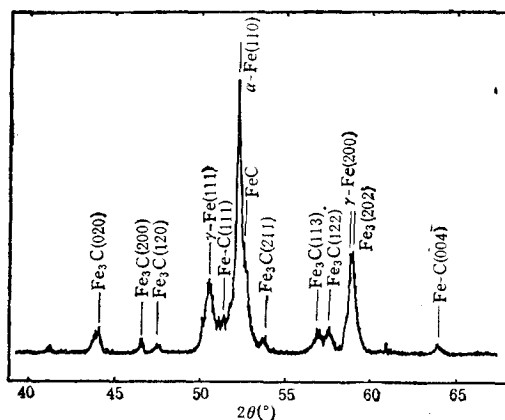
图1 合金层的俄歇线扫描图谱

金层中, 它的相组成比单一渗碳的要复杂得多, 它存在的物相除上述的以外还有 FeB , Fe_2B 存在。这些硬质相化合物的生成, 将对合金层的强化起重要作用。

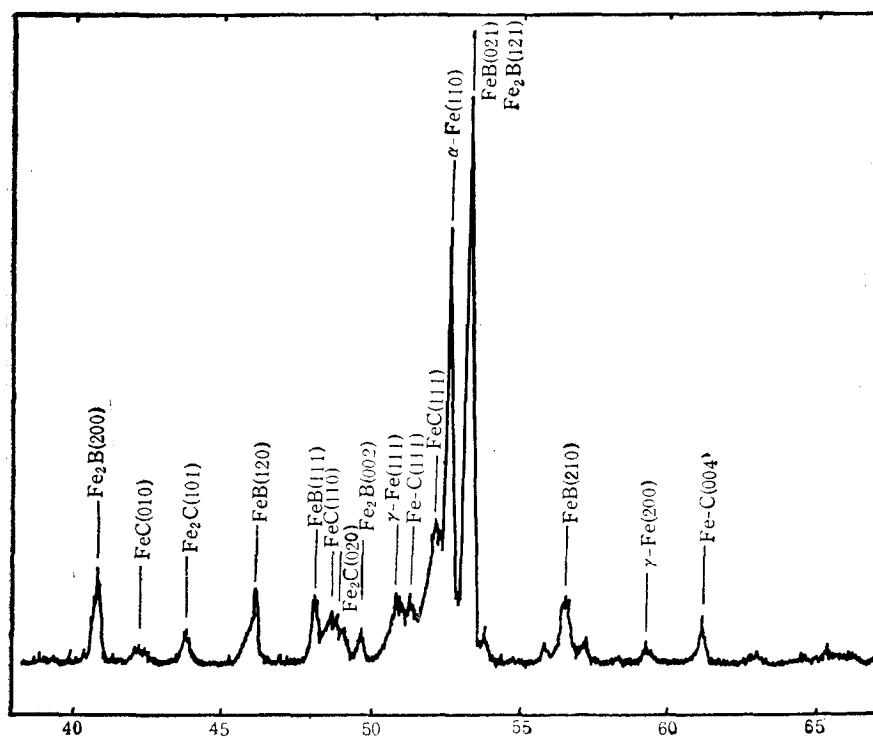
3. 合金层的显微组织分析

我们用 S-450 型扫描电子显微镜对合金层进行了观察, 结合 X 射线物相分析和相图可以对合金层的组织结构作分析。所得显微结构照片见图 3 (a), (b) (见图版 I) 和图 4 (a), (b) (见图版 I) 所示。

先观察两种样品的热影响区的组织, 因为基体同是 20 钢, 且处理的激光功率密度和作用时间相同, 涂层厚度也基本相同, 在激光束的辐照下, 表层吸收大量的激光能量, 使其熔化, 大量的热量由基体传走, 使靠近熔化区部分的基体温度上升到相变温度以上, 当激光束移去后, 基体急速自淬作用, 因而两种样品的热影响区出现了相似的针条状马氏体组织, 见图 3 (a) 和图 4 (a)。



(a) 渗碳层



(b) 碳硼共渗层

图2 合金层的X射线衍射图谱

CoK α ; 扫描速度 $\omega = 4^\circ/\text{min}$; 纸带速度 $v_p = 40\text{mm}/\text{min}$; 时间常数 $\tau = 1\text{s}$

渗碳层的组织结构见图3(b)所示,在表层处理区渗入了大量的碳,在熔化层当激光束离去时可获得的冷却速度约为 $10^4\text{--}10^5^\circ\text{C}/\text{s}$,故得到十分细小的枝晶组织。合金层的晶粒和熔化层连接的热影响区内的晶粒是连通的。合金层凝固时,和熔化区液态金属相接触的基体热影响区的基体金属起着熔池模壁的作用,是熔化的表层结晶时的现成表面

起着晶核的作用,表面合金层可从基体金属的晶粒上结晶并长大,晶粒成长方向与散热最快方向一致,垂直于熔合线向熔池中心发展。它生长出十分细小的枝晶组织,且均匀,枝晶间相偏析程度小,这对表面强化起着重要的影响。

图 4 (b) 是硼碳共渗层的显微组织结构照片。表层渗入了大量的硼碳元素,同样在凝固过程中沿热流方向结晶,其组织和常规化学渗硼组织相似,生长成指状组织。但这些指状组织不连续分布,可能是由于在渗硼同时渗入了碳元素所致,使得在硼化物“指尖”间析出了大量的碳化物堆积,这些碳化物使得硼化物的指状处于不连续分布。这可由 X 射线衍射物相分析中得知在渗层中确实存在大量的铁碳化合物而得到证实。

4. 合金层的硬度分布

采用 71 型显微硬度计测定了合金层的硬度分布,实验结果如图 5 所示。由于表层冷却速度大,形成了微小的枝晶组织,以及硼碳元素在表层生了大量的硬质相化合物,故较基体硬度大大提高,得到了较理想的强化效果。从图 5 中得知: 渗碳层具有的显微硬度为 HV1050。而硼碳合金层硬度较单一渗碳层又有较大提高,显微硬度高达 HV1280。在化学热处理中,我们已知渗硼可使表层达到很高的硬度,而在激光熔化渗硼处理中,其硬度同样得到了提高。这是因为显微组织中得到了弥散强化的共晶组织。不仅如此,同时激光渗硼还由此而改善了渗硼层脆性,使其韧性得到了提高,相对剥落减少。随着向内部推进,热影响区由于急冷淬火其相变组织的硬度也得到了较大的提高。

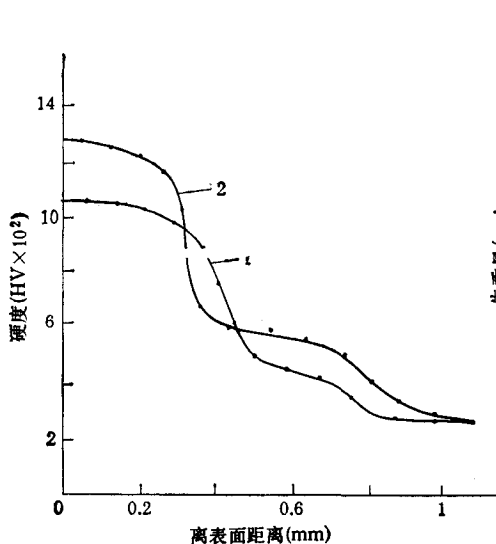


图 5 显微硬度分布曲线

1 为渗碳层; 2 为硼碳共渗层

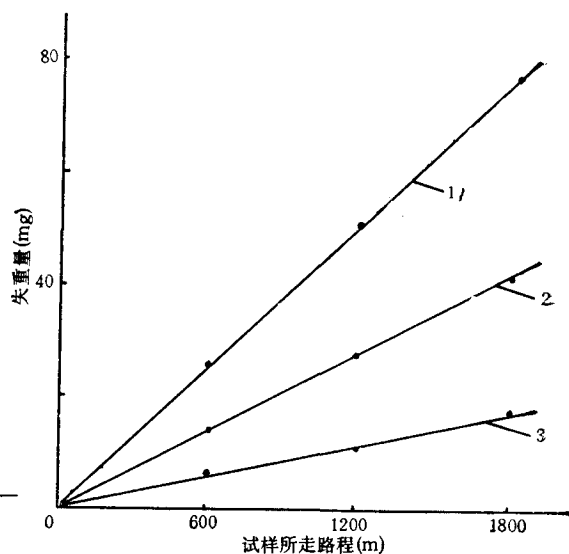


图 6 磨损曲线

1 为基体; 2 为渗碳层; 3 为硼碳共渗层

5. 耐磨损试验

经激光处理的样品,用 DMJ-1 型磨损机对其耐磨性能进行了比较试验,其结果示于图 6。可以看出经激光处理后的样品,其耐磨粒磨损性能较之基体材料有很大的提高,这与表面晶粒细化、成分均匀及表面残余应力有关。

四、结 论

通过以上对 20 钢表面渗碳和碳硼共渗合金化的初步研究可知,用这种方法可以在金属表层引起多种强化效应,从而在低质工件表面上获得了高性能合金表面所具有的优异性能。合金层与基体之间有很强的结合力,属于冶金结合,而新的合金的成份决定着合金层的显微组织,调整激光处理条件(冷却速度)可控制显微组织的细化程度。合金层强化主要受合金成份、相变规律的影响,晶粒细化强化、固溶强化、残余奥氏体及残余应力强化等作用相互交错,在实验中难以区分它们各自单独的作用。

- [1] D. S. Gnanamuthu, *Opt. Eng.*, **19**(1980), 783.
- [2] J. F. Ready, *Proc. IEEE*, **70**(1982), 533.
- [3] 张思玉等,中国激光, **13**(1986), 434.
- [4] 郑克全等,中国激光, **14**(1987), 571.
- [5] P. G. Moore, L. S. Weinman, *Laser Applications in Materials Processing*, Ed. John. F. Ready, 198, 120-5 (1979).

A STUDY ON THE CARBURIZING AND BORONIZING BY LASER IRRADIATION AND THEIR STRENGTHENING MECHANISM

ZHENG KE-QUAN ZHANG SI-YU

(Department of Physics, Lanzhou University)

ABSTRACT

In this paper, the experimental procedures are presented for carburizing and boronizing the 20 steel surface using a CW CO₂ laser with an output power of 500—2000 W modulated CW. We also give a comprehensive analysis about the phase structure, the phase morphology, the distribution profile of the hardness and the resistance to abrasion of the sample after laser treatment. The experimental results indicate that the microstructure, the mechanical properties and the chemical composition in the surface layer of material will basically change. Furthermore, a preliminary discussion of the strengthening mechanism of the penetrating element by laser irradiation is also presented.