

文章编号: 1001-3806(2002)01-0001-03

## 40 铬钢表面加碳激光合金化处理\*

魏 仑<sup>1,2</sup> 陈庆华<sup>1</sup> 李俊昌<sup>1</sup> 龙晋明<sup>1</sup> 陈君才<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>昆明理工大学材料科学与工程系, 昆明, 650093) (<sup>2</sup>上海交通大学材料科学院, 上海, 200030)

**摘要:** 对 40 铬钢进行表面加碳激光合金化处理, 得到深 0.25~0.35mm 的白口铸铁层, 白口铸铁层组织呈梯度变化, 晶粒明显细化, 显微硬度高达 1200HV<sub>0.3</sub> 以上。热影响相变区组织为马氏体, 并存在有针状马氏体到隐晶马氏体的分层, 硬度为 710~780HV<sub>0.3</sub>, 比常规淬火明显提高。采用高的激光密度、快的扫描速度, 有助于晶粒的细化, 从而使硬度提高。磨损实验表明, 白口铁层的磨损性能比常规淬火样品提高约 50%。

**关键词:** 40 铬钢; 加碳激光合金化; 白口铸铁; 耐磨性

**中图分类号:** TG 156.99 **文献标识码:** A

## Laser surface alloying of 40Cr steel with carbon

Wei Lun<sup>1,2</sup>, Chen Qinghua<sup>1</sup>, Li Junchang<sup>1</sup>, Long Jinming<sup>1</sup>, Chen Juncai<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Department of Material Science & Technology, Kunming University of Science & Technology, Kunming, 650093)

(<sup>2</sup>College of Materials, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200030)

**Abstract:** The 40Cr steel has been surface alloyed with a pre-deposited carbon powder layer by laser beam. White cast iron is obtained on the surface of the sample with a depth of 0.25~0.35mm. The microstructure of the melted zone is pre-dendrite and eutectic ledeburite whose size is obviously refined by the rapid quench. Its micro-hardness can get up to 1200HV<sub>0.3</sub>. The microstructure of the heat-affected zone is martensite with two sub-layers, one of which is pin-like martensite and the other, non-pin martensite. It indicates that the higher the scanning speed and power density, the smaller the grain, and therefore the higher the micro-hardness. The wear test shows that the wear resistance of the specimens has been increased by 50% than the general quenched samples.

**Key words:** 40Cr; laser alloying with carbon; cast iron; wear resistance

## 引 言

激光表面合金化是指在高能量激光束的照射下, 使基体材料表面一薄层与根据需要加入的合金元素同时快速熔化、混合, 形成厚度为 10~1000 $\mu$ m 的表面熔化层<sup>[1,2]</sup>。熔化层在凝固时获得的冷却速度相当于急冷淬火技术所能达到的冷却速度, 又因熔化层液体中存在着扩散作用和表面张力效应等物理现象, 使材料表面仅在很短的时间(50 $\mu$ s~20ms)内就形成了具有要求深度和化学成分处理的表面合金层, 因其某些性能高于基体, 故达到表面改性的目的。

激光表面合金化层与基体之间为冶金结合, 具有很强的结合力; 其工艺的最大特点是仅在熔化区

和很小的热影响区发生成分处理、组织和性能的变化, 对基体的热效应可减小到最低限度, 引起的变形也极小。它既可以满足表面的使用要求, 同时又不降低材料的整体特性; 由于合金元素是完全溶解于表层内, 因而获得的薄层成分处理是很均匀的, 对开裂和剥落等倾向不敏感。此外, 所用的激光功率密度很高(大于 10<sup>5</sup>W/cm<sup>2</sup>), 熔化层深度由激光功率和照射时间来控制<sup>[4]</sup>。由于冷却速度高, 使偏析最小, 并显著细化晶粒。

40Cr 是一种常用的调质钢, 具有较高的强、韧、塑性配合, 但其耐磨性能并不理想, 常规的表面处理如高频感应淬火、表面渗碳、渗氮等工艺对其耐磨性能提高有限。利用激光将 40Cr 钢表面熔化, 同时在熔池中加入石墨进行合金化处理, 在溶体的强烈对流作用下石墨在其中混合均匀, 最终使熔体中碳的含量达到 2% 以上, 成为液态铸铁。由于熔化层的快速激冷, 使 40Cr 表面生成坚硬的白口铸铁。从而可提高其表面耐磨性。

\* 国家教委回国留学人员基金及原有色总公司回国留学人员基金资助项目。

作者简介: 魏 仑, 男, 1973 年 11 月出生。博士研究生。主要研究方向为材料表面激光改性及生物医学材料。

收稿日期: 2000-11-27

## 1 试验材料和方法

选用 40Cr 退火钢为基材,原始组织为块状铁素体和珠光体。将颗粒半径为 5~10 $\mu$ m 的石墨悬浮在添加有 PVC 塑料粘合剂的丙酮溶液中,将其均匀地喷涂在经过打磨、清洗的基体上,其中 PVC 塑料粘合剂的作用是使石墨粉与基体良好地粘合。这样丙酮挥发后,石墨就很好地预置到试样表面。因涂层本身可以增加激光的吸收,故没有另涂吸收剂。

采用 HJ3 型千瓦横流 CO<sub>2</sub> 激光器,在不同工艺参数下对试样进行激光合金化处理。采用矩形光斑控制光束截面的能量分布,以降低熔化区中的温度梯度,用离焦量控制光斑尺寸;激光处理时的功率密度为(0.9~1.1) × 10<sup>5</sup> W/cm<sup>2</sup>,扫描速度为 1~6 mm/s,合金化时采用氮气保护。除磨损试验的样品为多道搭桥处理外,其余样品均为单道扫描。

分别用 Axiophot 大型金相显微镜和 HX-1000 显微硬度计对硬化层截面的显微组织进行分析,测量显微硬度以及合金层深度、宽度。用配有波谱分析的场发射扫描电镜(FEG-SEM) JSM-6301F 分析合金化区元素的分布情况;在自制的仿销盘式磨损机和转盘式砂料磨损试验机上进行湿性磨损试验。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 合金化层金相组织及讨论

试样加碳熔凝合金化处理后,熔池截面整体形貌如图 1 所示。A 为熔凝区, B 为过渡区, C 为热影响区。熔凝合金化层断面呈“球缺形”,这是矩形的激光

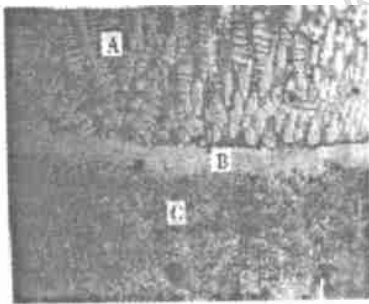


Fig. 1 Cross-section photography (100 $\times$ )

光斑在金属表面能量传导分布的具体反映,中间部分能量输入多,透入深度大;边缘部分能量输入少,透入深度小以及周围基体的散热条件所致。

显微组织如图 2 所示。硬化层由表及里分为 3 层。表面为熔化-凝固合金化得到的白口铸铁层(图 1、图 2a)。该层为典型的凝固组织。温度梯度/凝固速度( $G/v$ )是凝固组织生长形态选择的控制参数。在熔池/基底界面处  $v$  趋于 0 而  $G$  最大,  $G/v$  值很大,凝固组织以低速界面生长,随着  $v$  的增加和

$G/v$  逐渐减少,形成胞/枝转变区及枝晶形态的领先相与枝晶间共晶的生长形态,根据碳含量的不同,领先相有可能为初生奥氏体或初生渗碳体。

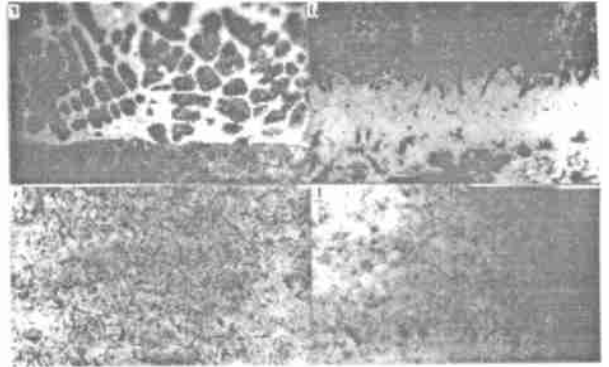


Fig. 2 Microstructure of different zone(750 $\times$ )

a—carbon alloyed zone b—transition zone c—pin-like martensite of the heat affected zone d—non-pin martensite of the heat affected zone

第 2 层为液固过渡层(图 2b),其组织为软的奥氏体组织。接下来为热影响区,热影响淬火区组织由针状马氏体(图 2c)过渡到隐晶马氏体(图 2d)。

在激光作用下,由于热扩散和合金化的共同作用,熔化部分和未熔部分存在温度梯度和碳浓度梯度,因而表、里层处理后得到的组织不同。表面熔化区中的碳粉在熔池的强烈对流下迅速均匀化,使得熔化区的成分达到液态铸铁的成分,在激冷的过程中,熔化区的液态铁水凝固生成白口铸铁,其组织为枝晶组织和莱氏体。枝晶和莱氏体的尺寸由加工工艺决定,当功率密度大于临界密度(约 10<sup>5</sup> W·cm<sup>-2</sup>)时,在试样表面生成熔池。在一定的激光功率密度下,扫描速度越快,则冷却速度相应地也就越快,表现在金相组织上就是白口铸铁层枝晶间距随着扫描速度的增加而减小,莱氏体组织也变得细小,整个表面熔化层晶粒就得到细化,从而使白口层的硬度和耐磨性提高。但并不是冷却速度越快越好,在极快的冷却速度下,有时不可避免地会产生微裂纹,使熔凝的合金化层在磨损过程中过早地脱落。

图 3 为表面合金化区碳元素分布的线扫描分析结果,在 200 $\mu$ m 深度的合金化区内 C 元素的浓度远远大于基体。

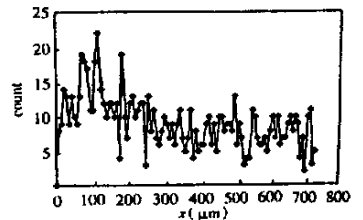


Fig. 3 The distribution of carbon versus depth obtained by linear analysis

### 2.2 合金化铸铁层显微硬度分布

材料的硬度与材料的许多力学性能有着重要的

联系。表面硬度的提高有利于提高材料的抗磨损性能。40Cr 表面白口化后的典型显微硬度曲线如图 4 所示。由曲线可以看出,加碳熔凝处理后表面显微

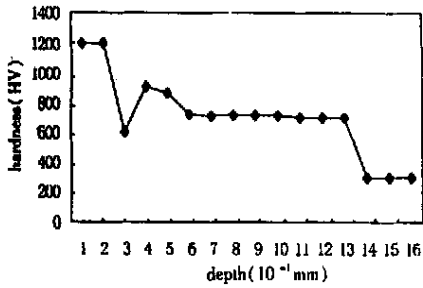


Fig. 4 The dependence of micro-hardness on depth

硬度值可以高达 1200HV<sub>0.3</sub>以上,这是由于表面加碳熔凝后激冷生成了晶粒度很小的白口铸铁。随着深度的增加,硬度迅速下降,这是由于到了软的液固过渡区,这里的残余奥氏体很多,由于残余奥氏体为软的组织,在这里硬度下降到最低值。再向深处,到达热影响区,由于激光淬火为急热急冷过程,碳在奥氏体中来不及均匀化,因而马氏体的含碳量较高。碳扩散不均匀又造成马氏体更细小。此外,激光热处理后的马氏体具有更高的位错,由于马氏体本身硬度的增高,马氏体细化以及很高的位错密度,使得激光相变后的马氏体具有超高的硬度,可达 700HV<sub>0.3</sub>,比常规淬火后高出约 100HV<sub>0.3</sub>。从硬度曲线我们还可看出,从激光硬化层到基体的硬度落差高达 400~600HV<sub>0.3</sub>,考虑原因主要有两个:其一是高能量密度的激光光束与表面的瞬时作用所造成的极大的温度梯度;其二是激光光束移动后的快速冷却。在这两个因素的作用下,造成激光强化带和基体之间的过渡带极薄,故硬度急剧下降至原始硬度,造成极大的落差。

在能量密度足以使表面熔化的前提下,随着扫描速度的增快,表面白口铸铁层及热影响区的硬度都明显增加。当扫描速度增加到某一值时,由于表面温度不足使铁熔化,表面没有生成白口铸铁,而热影响区的温度仍足以保证相变硬化,产生超细马氏体,故表面硬度下降而热影响区硬度继续增大。热影响区马氏体硬度可高达 720HV<sub>0.3</sub>。很明显,在保证试样表面熔化的前提下,增大扫描速度,则激光和试样之间的交互作用时间缩短,冷却速度增快,造成晶粒细化,使硬度明显增加。

### 2.3 光斑直径和扫描速度对熔池尺寸及合金成分的影响

表 1 是采用不同工艺参数时制备的样品以及各样品表面合金化层的深度、宽度及表面硬度。

Table 1 Samples synthesized with different experimental parameters

No.	1	2	3	4	5	6	7
power density / $10^5 \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.93	0.93	1.114	0.93	0.93	1.114	1.114
content of pre-deposited carbon / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	0.062	0.062	0.062	0.080	0.080	0.062	0.062
scan speed / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	3	4	6	3	4	4	6
depth/mm	0.39	0.24	0.23	0.25	0.23	0.27	0.23
width / mm	3.4	3.3	2.1	2.73	2.6	2.1	2.1
hardness / HV <sub>0.3</sub>	849	891	1211	1283	1314	996	1211

在激光加工工艺中,光斑直径与激光的功率密度有着密切的关系。在输出功率一定的情况下,功率密度的大小与光斑直径成反比,它直接影响着熔化层的几何尺寸,也即合金化层的深度和宽度。从表 1 可以看出,在表面预涂碳层厚度一定的情况下,随着激光功率密度增加(也即光斑半径减小)熔池宽度减小,说明熔池的宽度主要由光斑半径控制,而熔池的深度主要受扫描速度的影响,随着扫描速度的增加,熔池深度减小。宽度虽然也有所减小,但远没有深度的减小明显。在表面预涂碳层一定的情况下,熔池体积越大,石墨稀释越严重,熔凝部分的合金化程度越低,碳含量越少。所以光斑直径和扫描速度间接影响着合金化的程度。合理这两个参数对保证合金层的质量非常重要。

### 2.4 优化工艺合金化处理后耐磨性能分析

激光表面合金化处理后表面层硬度得到很大提高,最大硬度可达到 1200HV<sub>0.3</sub>以上,比 40Cr 基体(280~290HV<sub>0.3</sub>)提高了 4 倍以上。将优化工艺搭桥处理的样品分别在自制的仿销盘磨损机和转盘式砂料磨损试验机上进行湿性磨损试验。结果表明,白口铁层的抗磨粒( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )磨损性能比常规淬火处理的样品提高约 50%。这是由于激光合金化处理后表面生成了晶粒细小的白口铸铁层。如果采用较高输出功率的激光器,进一步提高合金化层深度,耐磨性能可望得到更大的提高。

## 3 结论

- (1) 40Cr 钢表面经激光碳合金化处理可得到一
- (下转第 8 页)

$$BER = \begin{cases} 0 & 0 < t_d < t_1 \\ (1 - \rho_0/A t_d)/2 & t_1 < t_d < T \end{cases} \quad (15)$$

相应曲线见图 10, 其中  $T = 20s$ , 为了便于观察曲线变化情况, 图中仅取 19.98s 到 20s 的一段。

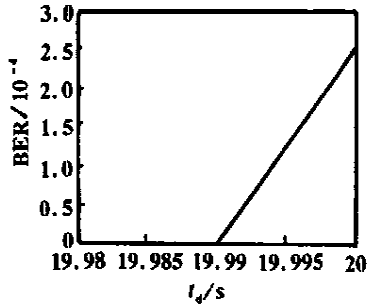


Fig. 10 Relationship between duration of sawtooth wave and BER in a period

(16) 式可知, 当  $m$  趋于无穷大时, 误码率趋于常数  $(1 - \rho_0/A)/2$ 。

### 4 结 论

上述讨论中将卫星的振动简化为正弦振动、方波振动、三角波振动及锯齿波振动, 并就振动的振幅、频率、持续时间等对误码率的影响进行了讨论, 从中可以得到以下结论:

(1) 振动的振幅对误码率的影响: 当振动持续时间为振动的整周期时, 误码率仅为振幅的函数。振动的振幅小于阈值时, 不会产生误码; 当振幅超过阈值时, 误码率随振幅的增加而迅速增加。

(2) 振动的频率对误码率的影响: 当振动持续时间为整周期时, 振动的频率对误码率没有影响。

(3) 振动的持续时间对误码率的影响: 当振动的持续时间为非整周期时, 误码率随振动持续时间的增加而波动, 波动的范围随时间的增加而减小, 误码率随时间的增加而趋于仅与振幅和阈值有关的量。

该项工作为我们进一步分析卫星的复杂振动对空间光通信的影响打下基础。同时, 也为研究由于卫星振动引起的跟踪瞄准等问题的补偿方法等打下基础。

### 参 考 文 献

- [1] Wittig M, Holtz L, Tunbridge D *et al.* SPIE Proc, 1994, 1218: 205 ~ 214.
- [2] Schultz K L, Kocher D G, Daley J A *et al.* Appl Opt, 1994, 33(12): 2349~ 2355.
- [3] Schultz K L, Fisher S. Appl Opt, 1992, 31(36): 7690~ 7695.
- [4] Oppenhauser G, Wittig M, Popescu A. SPIE Proc, 1991, 1522: 213.
- [5] Lutz H P. ESA Bulletin Optical Communication in Space, 1997, 91: 25 ~ 33.
- [6] 王秉军, 孙学军, 沈保锁 *et al.* 现代通信系统原理. 天津: 天津大学出版社, 1991.

而  $t_d$  大于一个周期时误码率为:

$$BER = \begin{cases} \frac{mT}{2(mT + \tau)} \left(1 - \frac{\rho_0}{A}\right) & 0 \leq \tau < t_1 \\ \frac{mT + \tau - (m+1)\frac{\rho_0}{A}T}{2(mT + \tau)} & t_1 < \tau \leq T \end{cases} \quad (16)$$

图 11 为  $m = 10$  时锯齿波型振动持续时间与误码率的关系曲线。不同  $m$  值所对应的曲线相似, 只是随  $m$  的增加误码率所能达到的最低点上升, 而由

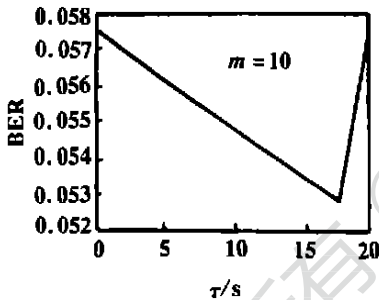


Fig. 11 Relationship between duration of sawtooth wave and BER when duration is longer than a period

(上接第 3 页)

层厚度为 0.25~ 0.35mm 的表面白口铸铁层, 其显微组织为莱氏体和树枝状结晶。树枝状结晶为转变了的初生奥氏体或初生渗碳体。热影响区为针状马氏体过渡到隐晶马氏体。(2) 白口铸铁层硬度高达 1200HV<sub>0.3</sub>, 热影响区硬度为 710~ 780HV<sub>0.3</sub>。(3) 采用高的激光密度、快的扫描速度, 有助于白口铸铁层枝晶细化, 能显著提高白口铸铁层的硬度。(4) 熔池的宽度主要由光斑直径决定, 扫描速度主要影响熔

池的深度, 对熔池宽度的影响不很强烈。(5) 磨损试验表明, 激光合金化得到的白口铁层的抗磨粒 ( $Al_2O_3$ ) 磨损性能比常规淬火处理的样品提高约 50%。

### 参 考 文 献

- [1] Gnanamuthu D S. 激光科学与工艺, 1982, 13: 65.
- [2] Gnanamuthu D S. Laser Surface Treatment. In: Metzbowler E A ed. Application of Lasers in Materials processing, Material Park: OH Am Soc for metals, 1979: 177.
- [3] 李 智, 马椿喻, 刘相华 *et al.* 材料科学与工程, 1999, 17(2): 81 ~ 84.