

文章编号: 1001-3806(2004)04-0352-03

珠光体灰口铸铁激光硬化层中石墨相行为研究

宋武林, 谢长生

(华中科技大学 国家模具重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 利用光学显微镜、电子探针等微观分析手段对灰口铸铁激光硬化层中石墨相行为进行了较为深入的分析。结果表明, 石墨在熔化层中完全溶解, 且扩散较均匀; 相变硬化层中石墨部分溶解, 而扩散不均匀; 在过渡层中石墨则基本不溶解。由分析可知, 石墨的这些行为与硬化层的组织及硬化效果有极其密切的关系。

关键词: 激光硬化; 灰口铸铁; 石墨; 扩散

中图分类号: TG156.99; TG665 **文献标识码:** A

The study of behavior of graphite phase in the laser hardening layer of gray iron

SONG Wu-lin, XIE Chang-sheng

(National Laboratory of Plastic Forming Simulation and Mould Technology, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: The behavior of graphite phase in the laser hardening layer of gray iron is deeply studied by means of optical microscope and electron probe. Results show that the graphite dissolves completely and diffuses uniformly in the melt layer; the graphite in the phase transformation hardening layer dissolves partly, but the diffusion isn't uniformity; and that the graphite in the transition layer does not dissolve basically. It can be concluded that the behavior of graphite has close relation with the hardening layer structure and the effect of hardening.

Key words: laser hardening; gray iron; graphite; diffusion

引言

灰口铸铁激光硬化工艺在国内外工业生产中已有了较为广泛的应用, 对其工艺特点和硬化机理亦有了一些文献报道^[1~4]。然而对灰口铸铁中某一特殊物相在激光硬化过程中行为的深入研究却很少进行, 但这些方面的研究无论对灰口铸铁激光硬化生产工艺的制订还是为进一步了解其硬化机理都有很重要的帮助。石墨相是灰口铸铁中的一个重要物相, 它在灰口铸铁激光硬化过程中的行为将对硬化效果有着极其重要的影响, 对其进行较为深入的研究无疑有重要的应用价值和理论意义。本文中 will 利用光学显微镜、电子探针等微观分析手段对灰口铸铁激光硬化层中石墨相行为进行较为深入的分析。

作者简介: 宋武林(1964-), 男, 教授, 博士, 现从事材料激光表面技术、纳米材料制备及其应用和新型模具材料及热处理方面的研究工作。

E-mail: wulins@public.wh.hb.cn

收稿日期: 2003-08-11; 收到修改稿日期: 2003-11-20

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

试验材料为自行浇铸的灰口铸铁, 试样成分见表1, 其原始组织主要为珠光体+片状石墨(A型)。激光表面硬化试样尺寸为45mm×40mm×10mm。

Table 1 Component of tested material

elements	C	Si	P	S	Mn	Cr	Fe
component/ %	3.35	2.18	0.035	0.03	1.18	0.32	others

1.2 试验方法

(1) 激光表面硬化: 将表面经黑化处理后的试样在2kW CO₂连续激光器上进行表面硬处理。其工艺参数为: 激光功率1.5kW~1.7kW, 扫描速度15mm/s~17mm/s, 光斑大小5mm。

(2) 硬化层中石墨形态: 用光学显微镜观察硬化层中熔化层、相变硬化层和过渡层的石墨形态及与原始组织中石墨进行比较。

(3) 硬化层中石墨行为: 用JXA-8800R电子探针分析硬化层中石墨溶解及重新扩散分布的规律。

(4) 硬化层中石墨行为与硬化机理:利用 D/MAX-III C 型 X-rays 衍射仪分析硬化层中各主要相的过饱和碳含量。

2 试验结果及分析

2.1 硬化层中石墨形态

灰口铸铁激光硬化层组织可分为 3 层,即熔化层、固态相变硬化层和过渡层,如图 1 所示。从图可见,熔化层组织为细小的莱氏体(部分区域有少量针状马氏体),并没有石墨存在,即石墨已完全溶解;相变硬化层组织为细小的针状马氏体 + 少量的石墨 + 残余奥氏体,其中石墨不仅量少,而且与原始组织中的石墨相比更细小;但过渡层组织则主要是马氏体 + 石墨 + 残余奥氏体 + 未溶的部分渗碳体,其中的石墨与原始组织中的没有差异。



Fig. 1 Micro-structure of laser hardening layer of gray iron 400 ×

上述灰口铸铁激光硬化层中石墨变化行为是与其表面在与激光相互作用时的温度分布相关的。据周卓华^[5]报道,激光与材料表面相互作用时硬化层中温度分布有极大的温度梯度。在一定工艺参数下,试样表层(约 0.1mm)温度将大于其熔点;次表层(0.15mm~0.25mm)温度为其奥氏体温度范围;过渡层温度则低于试样的奥氏体温度。而且各区域在其温度范围内停留时间极短,并根据石墨溶解的热力学条件,硬化层中将会出现石墨在熔化层中全部溶解、在固态相变层中部分溶解和在过渡层中不溶解的现象。

2.2 硬化层中石墨的均匀化

石墨在激光硬化层中不同区域溶解程度不同,而溶解后的分布情况则是另外一个令人感兴趣的问题。用电子探针对硬化层中熔化层、固态相变层和过渡层的碳分布进行了线分析,其结果如图 2~图 5 所示。图中形貌相中的白线条为线分析路径,图中的曲线为沿此线路的碳量分布情况。从图可看出,熔化层中尽管在少量的马氏体针中含碳量略低,但总体碳量分布较均匀;固态相变层中碳量分布明显

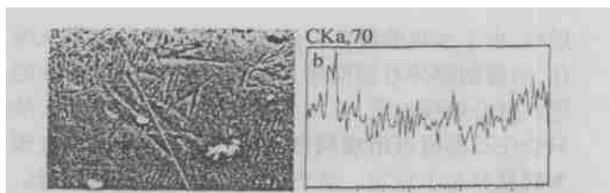


Fig. 2 Carbon distribution in the melt layer
a -melt layer SEM,1000 × b -line distribution of carbon

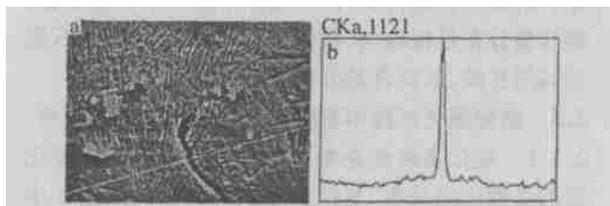


Fig. 3 Carbon distribution in the solid-state phase transformation layer
a -SEM,1000 × b -line distribution of carbon

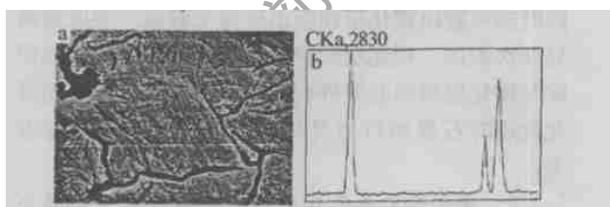


Fig. 4 Carbon distribution in the transition layer
a -SEM,1000 × b -line distribution of carbon

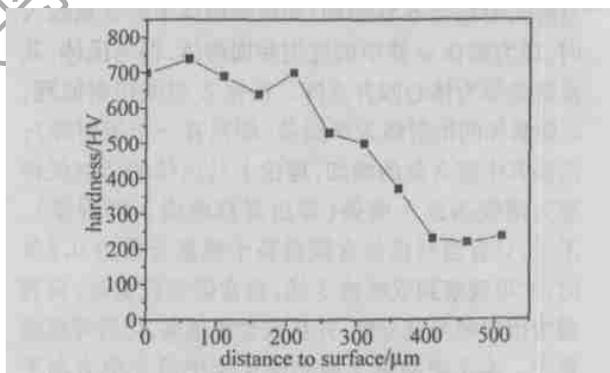


Fig. 5 Hardness in harden layer

不均匀,除部分未溶石墨仍保留大量碳外,靠近未溶石墨区域的碳量明显高于其它区域;而在过渡区中除石墨处外,碳量分布十分均匀,根据原子扩散理论,这也间接说明该区域石墨基本未出现溶解。

碳含量的以上分布规律是与来自溶解石墨的碳原子的传质行为有关。在熔化层中,由于温度很高,石墨完全溶解,并在液体中传质以达到均匀化。根据传质理论,传质有两种基本形式:扩散传质与对流传质。前者是微观运动,主要在固态中进行;后者则是宏观运动,是液相中的主要传质形式。显然对流传质速度更快,物质更易均匀化。这就是灰口铸铁激光表面硬化时,尽管熔化层处于液相的时间很短,但其中碳量分布较均匀的主要原因。而在固态相变层中,由于加热的温度较低,该层在加热时基本未熔

化,溶解的部分石墨而带来的碳原子只能以扩散的形式进行短程传质,再加上激光处理加热时间短,故只会在石墨附近出现局部富碳现象,因而该层表现为碳量分布不均匀。至于过渡层,处理时温度更低,石墨基本不溶解,相变过程中仅发生原珠光体中碳原子的短程扩散传质,而珠光体中从整个物相来看,碳含量分布是较均匀,故过渡层中如不考虑原石墨的强烈富碳,其碳含量分布显得更均匀。

2.3 激光硬化过程中石墨行为与硬化机理的关系

2.3.1 硬化层硬度分布 用显微硬度计测定硬化层的显微硬度分布,其结果如图5所示。从图5中可看出,灰口铸铁激光硬化层硬度有了显著的提高;同时亦可看出硬化层硬度出现两个峰值。硬度最高处在次表层。硬化层的硬化及其这种硬度分布规律除与硬化层组织有关外(另文分析),主要与激光硬化处理时石墨的行为及其溶解后碳的扩散规律有关。

2.3.2 硬化层中马氏体的过饱和碳含量 常温下Fe,C固溶体中碳含量极小时,可认为其点阵常数、点阵类型均与 α 铁相同;如该固溶体中碳含量较大时,成为碳在 α 铁中的过饱和固溶体,即马氏体,其点阵类型为体心四方点阵。根据X射线衍射原理, α 铁素体的衍射线为单线条(即只有一个衍射峰);而随其中碳含量的增加,理论上马氏体的衍射线将变为两线条或3线条(即出现双峰或3峰现象)。不过,只有当马氏体含碳量高于质量分数为0.6%时,才可观察到双峰或3线;当含碳量较低时,只表现为衍射峰变宽变钝,并且碳含量越高,衍射峰就越宽^[6]。本文中测量了激光硬化层中沿光束方向不同位置上马氏体的衍射峰(200)、(211)的峰宽(以半高宽为标准),用来衡量不同位置马氏体中碳含量的变化。其结果如图6所示。其依据为图7所示的

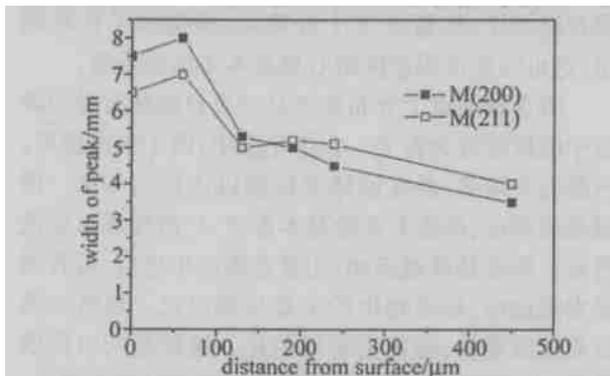


Fig. 6 X-ray diffraction peak width of martensite in harden layers

硬化层不同位置的X射线衍射谱,从图7中可看出,只有衍射线b中的M(211)可以看到较明显的双峰现象。

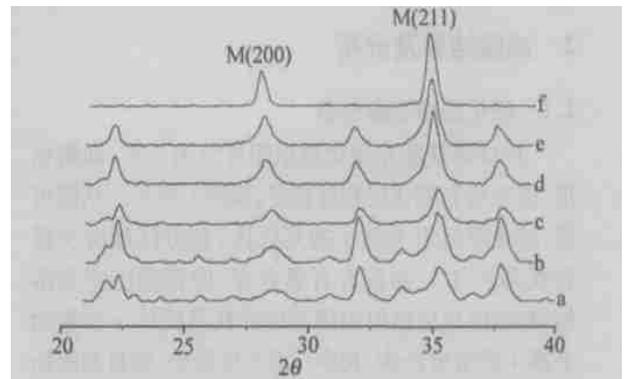


Fig. 7 X-ray diffraction spectrums in harden layer

a—at surface b—distance is 0.06mm from surface c—distance is 0.13mm from surface d—distance is 0.19mm from surface e—distance is 0.24mm from surface f—substrate * other peaks are austenite

从图6、图7可看出,次表层中马氏体的X射线衍射峰最宽,且出现了双峰现象(见图7b),说明此处马氏体中过饱和碳含量最高;随着表面距离的增加,双峰现象不再明显,峰宽也逐渐变小,说明其各处马氏体中过饱和碳含量逐渐减小。这显然与硬化层在激光硬化处理时各处的温度及其石墨的溶解程度有关,即离表面的距离越小,处理时的温度越高,石墨的溶解程度越大,因此其马氏体中的过饱和含量就越高。然而,表层的碳含量却稍低于次表面,似乎与以上分析不太相符,这主要是因为液态传质除上面分析的对流外,在液体表面还存在另外一种形式,即表面蒸发传质。激光作用于合金熔体时,所产生的高温和激光对物质原子或分子的激发作用便会使具有相当快的蒸发。若溶质原子对激光有更强的吸收能力,将会出现所谓的选择性优先蒸发。据王家金^[7]报道,石墨对 CO_2 激光的吸收率为0.63,而Fe的吸收率仅为0.035,前者是后者的20倍,故石墨会出现优先蒸发传质现象,使硬化层表面出现脱碳现象,故硬化层表面尽管温度最高,石墨溶解最完全,但其中马氏体的固溶碳含量却低于次表层。

对照图5、图6可发现,马氏体的固溶碳含量越高,基本上硬化层中该处的硬度亦越高,可见碳在马氏体中的过饱和固溶而产生的固溶强化是灰口铸铁激光表面硬化的主要机理之一,而石墨在激光硬化处理过程中的行为(溶解程度和均匀化扩散)对其有极其重要的影响。图5中距表面0.12mm处有一硬度谷值点,这主要与该处的残余奥氏体量有关(具体分析见另文)。

着腔长的增加,FFP的峰值反射率逐渐变小;同样反射谱的反衬度也逐渐降低。所以在设计FFP时,在满足波长动态范围的要求下,还要适当地减小FFP腔的间隙,以便得到较大的反衬度和高的反射率。

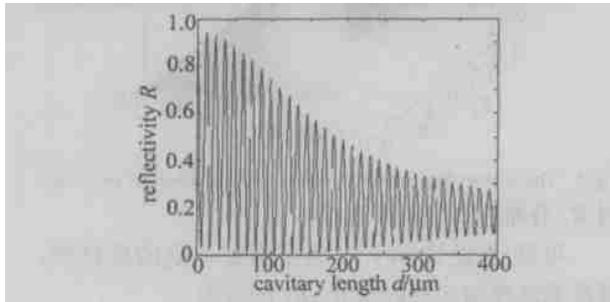


Fig. 7 The relation between reflectivity and cavity length of FFP

6 实验结果

采用以上思想设计的FFP作为边带滤波器,实现了对光纤光栅传感器的波长解调,考虑到传感器的波长变化范围为1nm,在综合考虑解调系统的线性度、反衬度和反射率的条件下,首先确定FFP的自由光谱区 $\Delta\lambda = 8\text{nm}$,由(12)式得腔长 $d = 150\mu\text{m}$;在考虑反射谱的反衬度和反射率条件下FFP腔的两个端面的反射率分别选为 $R_1 = 0.2$, $R_2 = 0.6$;另外选用模场直径 $W_0 = 9.9\mu\text{m}$ 的单模光纤,由此实验得到FFP的反射谱如图8所示,根据(2)式计算得其反衬度 $V = 0.97$,最大反射率为 $R = 0.65$ 。采用此FFP干涉仪实现了对光纤光栅波长解调,最终系统的测量精度达到 $1\mu\text{m}$ 。

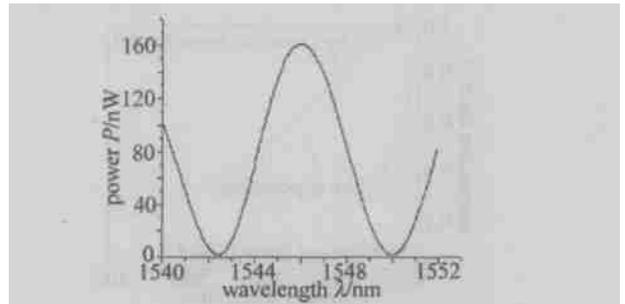


Fig. 8 The reflectivity spectrum of FFP

参 考 文 献

- [1] KALAMKAROV A L, FITZGERALD S B, MACDONALD D O. The use of Fabry-Perot fiber optic sensors to monitor residual strains during pultrusion of FRP composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 1999, 30(1): 167~175.
- [2] 毕卫红,王 昕,郎利影. 光纤 Fabry-Perot 干涉式温度测量 [J]. *光电子·激光*, 2002, 13(12): 1316~1317.
- [3] 李志全,王志斌,董 凯. 光纤 F-P 加速度传感器的研究 [J]. *传感技术学报*, 2001, 9(3): 206~209.
- [4] CLAUS R O, SUDARSHANAM V S, MRPHY K A. Interferometric optical fiber sensors for ultrasonic wave measurement [M]. New York: Wiley, 1995. 249~269.
- [5] 陈长勇,乔学光,贾振安 *et al.* 光纤光栅传感应用中的波长编码信号解调技术 [J]. *半导体光电*, 2003, 24(2): 121~127.
- [6] MURPHY K A, GUNTHER M F, VENGSARKAR A M. Quadrature phase-shifted extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(4): 273~275.
- [7] 吴 强,郭光灿. *光学* [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2003. 67.
- [8] 杨朝晖,刘浩吾. F-P 型光纤应变传感器混凝土试验研究 [J]. *实验力学*, 1998, 13(1): 41~46.
- [9] 亚里夫 A. *量子电子学* [M]. 上海:上海科学技术出版社, 1983. 116~118.

(上接第 354 页)

3 结 论

(1) 灰口铸铁激光硬化处理时,石墨在熔化层完全溶解,在固态相变硬化层中部分溶解,而在过渡层中则完全没有溶解。(2) 来自溶解石墨的碳在熔化层有较均匀的扩散,而在固态相变硬化层中碳则富积在原石墨位置附近,扩散不均匀。(3) 硬化层中马氏体的过饱和碳含量随表面距离的增加而减小,硬化层中的硬度亦有与此极相对应的变化规律,这说明因石墨溶解带来马氏体中碳的过饱和固溶强化是灰口铸铁激光表面硬化的主要硬化机理之一。

参 考 文 献

- [1] 沈 莲,李成芳,王秀琴 *et al.* 激光处理对灰铸铁显微组织的影响 [A]. *全国激光热处理学术会议论文集'88* [C]. 上海:上海市新闻出版局, 1989. 42~46.
- [2] 左养秀,刘凤琴,张 忠. 东风 4 型内燃机柴油机气缸套激光热处理 [A]. *全国激光热处理学术会议论文集'88* [C]. 上海:上海市新闻出版局, 1989. 19~23.
- [3] 姚建华. 摩托车汽缸内壁激光处理 [A]. *全国第六届高能束热处理学术会议论文集* [C]. 北京:电子工业出版社, 1997. 36~41.
- [4] MOLIAN P A. Fatigue characteristics of laser surface-hardened cast irons [J]. *J Engineering Materials and Technology*, 1987, 109: 179.
- [5] 周卓华. 铸造镍基高温合金熔凝、熔覆的开裂行为研究 [D]. 武汉:华中理工大学, 1995. 39~40.
- [6] 范 雄. *X射线金属学* [M]. 北京:机械工业出版社, 1981. 96~97.
- [7] 王家金. *激光加工技术* [M]. 北京:中国计量出版社, 1992. 113~115.