

灰铸铁经激光熔凝后的组织

清华大学 朱 捷 刘家藩 陈南平

[摘要] 激光熔凝后的灰铸铁具有枝晶型或共晶表层+枝晶型组织。共晶表层由于形成 Fe_3C 和马氏体而得到极高的硬度和较好的耐磨性。另外, 还分析了熔凝区中石墨的行为及过渡区的组织。

Microstructure of Laser Melted Gray Cast Iron

Zhu Jie Liu Jiajun Chen Nanping
(Tsinghua University)

[Abstract] Laser melted zones of gray cast iron have two kinds of microstructure: One is eutectic structure with high hardness ($\sim 1010 \text{ Hv}$) and wear resistance the other is dendritic structure with low hardness. TEM and quantitative x-ray analysis show that the former is strengthened by Fe_3C carbides and martensite. In addition, the behavior of graphite in laser melted zone and transition zone is discussed.

一、引 言

铸铁作为结构零件在实际中的主要失效形式之一是磨损失效。采用激光处理技术可以提高其硬度、细化其组织和提高其耐磨性, 故这种技术日益受到重视^[1-4]。本文对经激光熔凝后灰铸铁的组织作了系统研究, 并对其硬化机理及相组成作了比较分析, 另外还分析了在激光处理时石墨的变化, 以及白色边界的成因等。

二、实 验 方 法

灰铸铁(表 1)的原始组织是 A 型石墨+珠光体。在将其黑化处理后, 用 900~1800 W 的 CO_2 激光束(光斑直径是 $\sim 4 \text{ mm}$, 扫描速度是 0.5~3.5 m/min)进行处理, 同时用氮气(4 atm)保护。

用 200 g 载荷测定熔凝区中各种组织的硬度, 在 SEM 下观察组织形态, 并测定合金元素分布。用 x 射线衍射及电子衍射方法分析相组成。x 光机是 D/max-RB 型(40 kV, 80 mA, CuK_α), TEM 是 EM-400 及 H-700 型。

三、结 果 及 讨 论

1. 熔凝区

表 1 铸铁的化学成分(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Al	Fe
3.48	1.52	0.67	0.2	0.08	0.01	余量

灰铸铁经激光熔凝后的组织(在横截面上)可分为: (a) 单一枝晶组织; (b) 共晶表层+枝晶(图 1)。有关单一枝晶组织已有研究报道^[1-7], 本节将主要集中在共晶表层+枝晶型组织上。

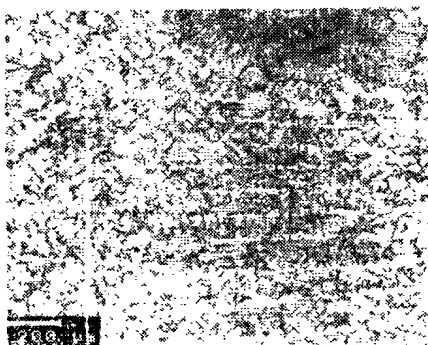
(1) SEM 研究

在一般的工艺条件下, 大多得到单一枝晶组织, 只有在中等试验条件时(如扫描速度是 2.5 m/min, 功率是 1200 W)才能得到共晶表层。此时共晶组织极细密(图 2), 并形成于枝晶组织上方(即形成一个表层)。

分析表明(图 3), 共晶表层含碳量稍高于其下方的树晶, 且碳分布较均匀。含碳量的差异可能由下述因素造成: (a) 因在处理过程中表面上予涂覆的黑化



(a) 枝晶组织和石墨(球), 光学×200



(b) 表层共晶组织和枝晶组织

图 1 激光熔凝区形态

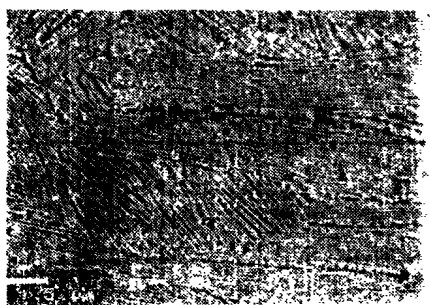
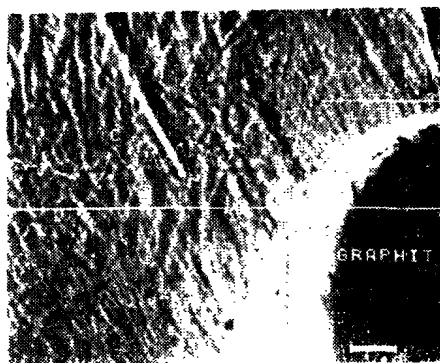


图 2 横截面上形态(右边是表面)

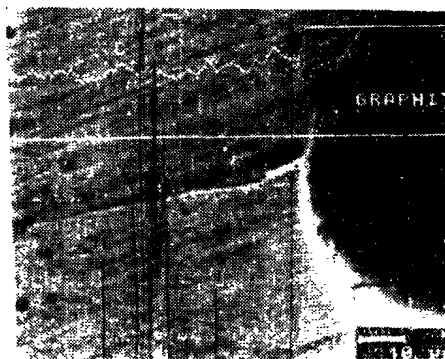
涂料中的碳向熔化区渗入。这种渗入在中等扫描速度时最大,而在低速时可能因碳在整个熔区中混合均匀使表层不易达到共晶碳含量。在高速时因熔化时间短,使碳的渗入不明显,也不易达到共晶碳含量;(b)有时,可以观察到铸铁中的石墨在熔化区中向上浮的同时,向其四周扩散碳,使液体中碳含量提高。有时石墨靠近表面的部位,易于形成共晶体(图5),这或许与此处高的温度有关;(c)在凝固时随固液界面由熔区底部向表面推进,碳在界面液体一侧总是高些,故表层中碳含量必然较高。(注意本实验用料的碳当量是 $C\% = 1/3 Si\% + C\% \approx 3.99 < 4.33$, 故在固液界面上



图 3 从共晶表层到枝晶区的碳分布



(a) 枝晶区



(b) 共晶区

图 4 石墨(对应于图1a)附近的碳分布,注意图a是相对于图b转动90°角拍摄的

碳的分配系数 $K < 1$ 。

(2) 相组成

由X射线相分析结果(图5和表2)可知,激光处理后的共晶表层中主要有 Fe_3C + 马氏体 + 残余奥氏体,其中 Fe_3C 含量最高。

Chen等^[7]对球铁(3.56%C, 2.75%Si, 0.013%S, 0.51%Mn, 0.39%Cu及微量Cr, Mo, Ni, Ti,

表 2 共晶表层 x 光衍射谱的标定结果

№	2θ (deg.)	d(Å)	组成相			
			M ₃ C	C	M	γ
1	37.76	2.38	112/021			
2	39.86	2.259	200			
3	40.68	2.215	120			
4	42.92	2.105	121			
5	43.34	2.085				
6	43.76	2.065	210			111
7	44.56	2.031	022	101	110	
8	44.98	2.013	103			
9	45.90	1.975	211			
10	48.59	1.872	113			
11	49.16	1.851	122			
12	50.86	1.798		102		200

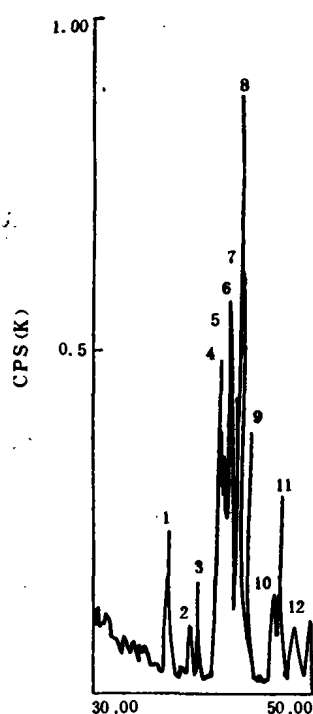


图 5 共晶表层的 x 光衍射谱 2θ(deg)

Mg) 进行激光熔化处理, 得到枝晶组织 (~HV 660), 并发现枝晶是奥氏体, 熔区中还存在少量石墨 + 铁素体 + 渗碳体。沈莲等^[6]对灰铁(3.3%C, 2.3%Si, 1.1%Mn 及 S, P)的研究表明, 熔区组织是枝晶(M + γ_{Fe}) + 枝间莱氏体(马氏体 + 残余奥氏体 + Fe₃C), 这

说明枝晶型组织与本文得到的共晶表层在各组成相的含量上相差很大。

在共晶表层中, Fe₃C 之间分布着马氏体 + 残余奥氏体, 马氏体有位错及孪晶型(图 6)。马氏体的宽度和长度各是 <0.125 μm 及 <0.63 μm, 共晶 Fe₃C 极细小(宽度约 0.44 μm), 其平均间距约 0.25 μm。在这种 Fe₃C 中存在一种片状亚结构(图 6 和 7), 它是快速凝固的特定产物, 有待进一步研究。

表 3 显微硬度

组织	HV (200 g)
原始组织	311—340
过渡区	500—677
枝晶区	660—700
共晶表层	1000—1010

(3) 显微硬度和耐磨性

分析表明(表 3), 共晶表层的硬度最高, 枝晶组织其次。激光处理区的硬度总的来说均比原始组织的硬度高。在环块磨损试验机上作了磨损试验。条件是 P = 107.8 kg, n = 400 r/min, 40°油润滑, t = 40 min 用标准 GCr 15 钢对磨环(~HV 850)。发现共晶表层(厚度 200 μm)的磨痕宽度约 0.42 mm, 枝晶组织约 0.50 mm, 而原始组织约 0.67 mm。因此, 在硬度提高时耐磨性也提高了。

硬度提高的原因可解释如下。共晶表层是由(大量 Fe₃C + 马氏体 + 残余奥氏体)构成的, 故主要是碳化

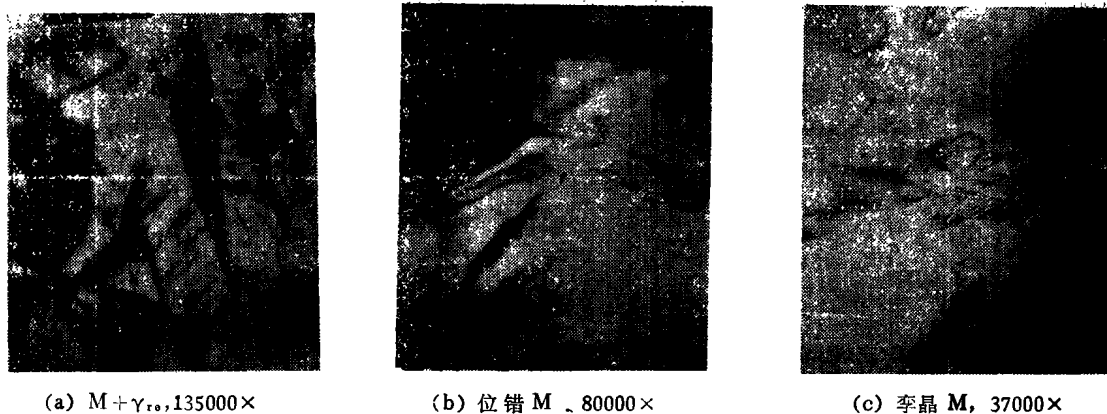


图 6 碳化物之间的 $M+\gamma_{Fe}$



(a) 碳化物的形态, 60000×



(b) SADP, $Fe_3C, B=[0\ T\ 2]$

图 7 共晶表层中的碳化物形态

物强化, 还有细晶强化及马氏体强化。枝晶组织中碳化物(存在于枝晶间)含量极低, 但同时又含有马氏体+残余奥氏体, 因此枝晶组织比原始组织硬得多, 但却比共晶表层软。

2. 过渡区

在熔凝区和原始组织之间存在过渡区(图 1 a, 图 8), 其中分布着针状马氏体块状区域及白色边界。分



图 8 过渡区的形态, 光学 400×

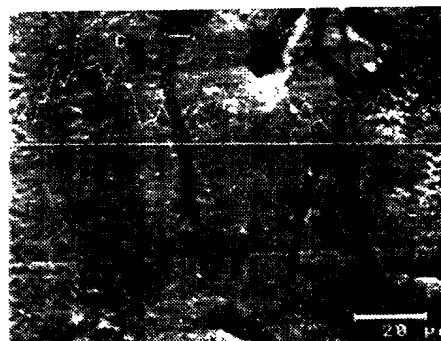


图 9 过渡区中碳的分布

析表明(图 9), 马氏体区域富碳而白色边界相对贫碳, Si 和 Mn 分布基本均匀。

白色边界中有少量马氏体针, 其余部分可能是残余奥氏体。白色边界的形成机理可分析如下。凝固时, 液相中的温度梯度 G 和晶体凝固速度 R 之比值 G/R , 决定了所形成的组织形态。激光熔化区是从其底部开始凝固的^[8], 此时 G/R 极大。因此在未熔化的原始组织和熔化区之间就形成了平面状凝固组织, 这就是白

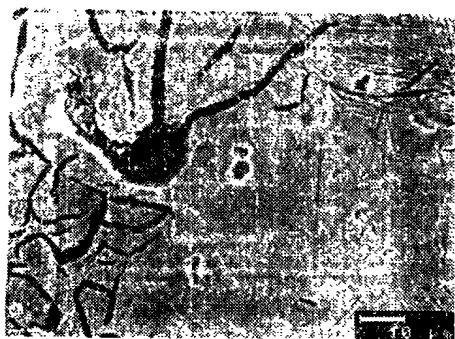


图 10 石墨形态(在熔区表面上)

色边界。又由于本文用料的碳当量是 $399 < 4.3$, 属于亚共晶铸铁, 合金元素在液固界面上的分配系数 $K < 1$ 。所以, 晶体成分是 $KC_0 < C_0$ (C_0 是原材料的平均碳含量), 即白色边界会相对贫碳。

3. 石墨的行为

在熔凝区中石墨呈球状(图 1a)或正在聚集成球(图 10)。在过渡区中, 可见石墨明显细化(图 8)。说明在激光处理时, 石墨(片)首先是因碳向四周扩散而细化, 当温度进一步升高而发生熔化时, 石墨又向上浮, 且有时会呈现聚集成球(块)状。所以在熔凝区中, 很难见到石墨(片)。另外, 在过渡区中, 因石墨四周的基体此时碳含量提高, 故易于先发生熔化, 而其它区域的或在较高温度熔化或只经历固态相变, 从而使过渡区中出现不连续分布的块状马氏体区域。

四、结 论

1. 激光熔凝处理后的灰铸铁有两种组织形态, 一

(上接第 24 页)

形成 Mn_5Si_3 硅化物颗粒, 而 Mn 、 Si 、 Fe 、 Al 同时加入则形成另一种硅化物 Fe_3Si 颗粒相。

2. 硅化物 Mn_5Si_3 和 $SiFe_3$ 对提高黄铜的强度和耐磨损性能都有显著的作用。而 Fe_3Si 在改善耐磨损性能上比 Mn_5Si_3 更有效。

3. 过高的铝含量会导致合金塑性的过度下降, 所以合理控制 Al 含量是高强度耐磨黄铜应用中需要继续探讨的问题。

参 考 文 献

- 1 Toyota Jidosha Kogyo Kabushiki Kaisha. Copper Base Alloy Having Wear Resistance at High Temperatures. British Patent Specification. Patent No. 1306484
- 2 Copper Development Association (CDA).

是枝晶型, 二是共晶表层 + 枝晶型。

2. 共晶表层由大量 Fe_3C + 马氏体 + 残余奥氏体, 并由于形成 Fe_3C 和 马氏体强化得到极高硬度 (HV 1010)。而枝晶组织硬度较低, 其硬化机理主要是马氏体强化。

3. 过渡区中的白色边界是平面状凝固产物, 其组成是马氏体 + 残余奥氏体, 其碳含量较低是因液固界面上碳分配系数 $K < 1$ 所致。

4. 原始组织中的石墨(片)在激光处理时促进四周基体熔化, 并会在自身溶解的同时, 向表面上浮。

参 考 文 献

- 1 Miller J. E. Wineman J. A. Met Prog. 1977 (5): 38
- 2 Bergman H. W. Surface Eng. 1985, 1(2): 137
- 3 川澄博通. 机械と工具. 1979, (5): 115
- 4 Molian P. A. Baldwin M. Wear 1987, 118: 319
- 5 Giordano L. Ramous E. Laser Surface Treatment of Metals. edited by C. W. Draper and P. M. Dordrecht Martinus Nijhoff Publishers. 1986, 483
- 6 沈莲, 李成芳, 王秀苓, 马丽华, 朱道珍. 第二届全国激光热处理学术会议. 1988, 武汉, P 21
- 7 Chen C. H. Altstetter C. J. Rigsbee J. M. Met. Trans. A. 1984, 15: 719
- 8 Greenwald L. E. Laser-Solid Interaction and Laser Processing. Am. Inst. of Physics 1978, 189
- 9 High Tensile Brasses Pub. 42. 1986
- 10 Snn Y. S. Lorimer. G. W. Met. Trans. 1989, 20 A. 1199~1206
- 11 ASTM X-Ray Powder Diffraction Data File. 11~616
- 12 崔崑. 钢铁材料及有色金属材料. 419
- 13 Chang Y. A. Neuman. J. P. Mikula A. and Goldberg D. Phase Diagrams and Thermodynamic Properties of Ternary Copper Metal Systems. 558~565, 669~675, 543~548. International Copper Research Association. 1979
- 14 Watanable H. Kono N. Gonda M. J. Japan Inst. Metals. 1972, 26: 297
- 15 Pops. Trans. H. Metall. Soc. AIME. 1964, 230: 831
- 16 Sun Y. S. Lorimer G. W. Ridley N. Mater. Sci. & Tech. 1989, 5: 162~171
- 17 孙扬善. 金属学报. 1988, 24(3): 168~172