

渗硼层激光熔化急冷处理

孙达 张福生 孟繁中

(兰州大学)

提要 研究了45钢 Fe_2B 硼化层经激光熔化处理熔池深度和激光参数之间的关系及临界熔化层中的相分布,发现:(1)在给定的激光功率密度下,熔池深度 H 与扫描速度 v 有如下关系: $H=K/v^{0.65}$;(2)熔区中某一区段出现了FeB相;(3)在硬度-距离曲线上有一硬度峰,峰高和峰位随扫描速度而异并与相分布有关。

Rapid cooling of laser surface melting of boronized layers

Sun Da, Zhang Fusheng, Meng, Fanzhong

(Lanzhou University, Lanzhou)

Abstract: Relationship between the melting depth and laser parameters in laser melting treatment of Fe_2B boronized layers and phase distribution of 45* steel is studied. It was found that: (1) the melting depth H is related to the scanning speed v as $H=K/v^{0.65}$, at a given laser power density; (2) there is FeB phase in a melted zone; (3) curve of hardness distance from the surface has a hardness peak and the position of which depends on the scanning speed.

一、前言

众所周知,渗硼层具有高硬度、高耐磨性和耐蚀性,然而由于渗硼层有脆性大和内应力大等缺点,应用范围受到一定的限制。

为了改善渗硼层的脆性,须消除内应力和改变渗硼层的相组织结构。近十年来在这方面做了许多探索性的研究^[1,2],并取得了一定的成绩。在各种试验使用技术中采用渗硼层激光共晶化处理来改善其组织和性能,认为是有效的方法之一。激光束能以高的能量密度在金属表面上扫描,并利用低温基体吸热自冷的作用可使金属熔液以每秒 $10^4\sim$

10^6 °C的速度冷却。这种快速冷却,使合金熔液有较大的过冷度,抑制先共晶相的形成,能细化晶粒,减少成分偏析和形成饱和度很高的固溶体。这些特点是常规共晶处理达不到的。

二、试样制备

尺寸为 $20\times 20\times 7$ mm,成分为0.42~0.47% C, 0.17~0.3% Si, 0.5~0.8% Mn的45钢。850°C正火,850°C液体渗硼7小时,三钾试剂腐蚀和X射线表面分析表明,硼化层为只含有 Fe_2B 的单相硼化层,其平

收稿日期:1986年10月6日。

均厚度约 $60\ \mu\text{m}$ 。所用的激光器输出功率 $700\ \text{W}$ ，光束直径为 $3\ \text{mm}$ ，分别以 $4\ \text{mm/s}$ 、 $8\ \text{mm/s}$ 、 $16\ \text{mm/s}$ 、 $20\ \text{mm/s}$ 、 $25\ \text{mm/s}$ 和 $30\ \text{mm/s}$ 的速度进行扫描。光束的平均功率密度为 $10^4\ \text{W/cm}^2$ 左右，扫描间距为 $4\ \text{mm}$ 。为了增加金属表面的吸收率，试样经磷化处理。

三、结果和讨论

3.1 熔池深度与激光参数的关系

在激光功率为 $700\ \text{W}$ ，光束直径 $3\ \text{mm}$ 的条件下，测量了不同扫描速度的熔池深度，所得结果列于表 1。

表 1 扫描速度和熔池深度

扫描速度 $v(\text{mm/s})$	4	8	16	20	25	30
$\lg v$	0.602	0.903	1.204	1.301	1.398	1.477
熔池深度 $H(\mu\text{m})$	83.4	52.5	34.1	26.6	24.1	21.6
$\lg H$	1.89	1.72	1.50	1.43	1.38	1.34

用回归分析法定出 $\lg H = A + B \lg v$ 中的系数 B 为 -0.65 ，线性拟合系数为 0.997 。由此可以看出 $\lg H$ 与 $\lg v$ 之间是精确的直线关系： $H = K/v^{0.65}$ ，式中 K 是与激光功率密度、材料的导热率以及表面状态有关的比例常数。

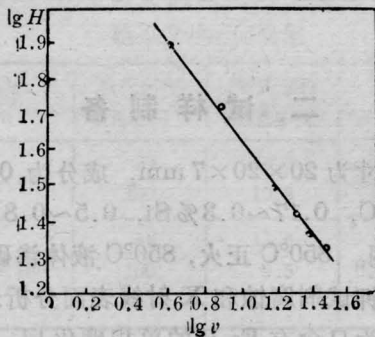
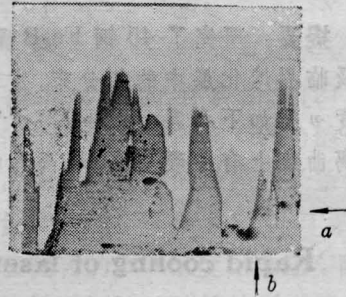


图 1 熔池深度与扫描速度的关系

3.2 渗硼层经激光熔融后显微组织的变化

原始渗硼层的显微组织为不连续的舌状物，如照片 1 所示。光镜和 X 射线表面分析表明，原渗硼层是由 Fe_2B 和少量的 $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$ 所组成。硼和碳在硼化层中的分布是极不均匀的。图 2 中的 (a) 和 (b) 图是在照片 1 中沿 a 和 b 的方向和部位硼和碳分布的俄歇扫描图。从图 2 可以看出，在硼化层中舌



照片 1 原始渗硼层的金相照片 ($\times 360$ ，三钾试剂腐蚀)

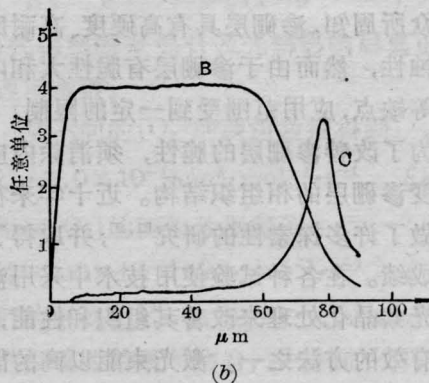
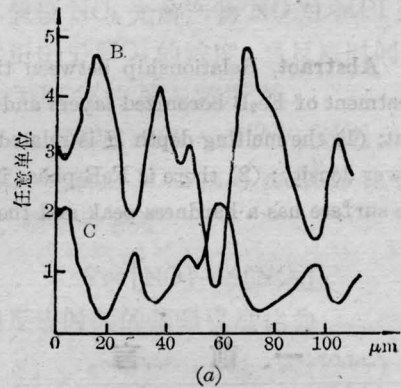
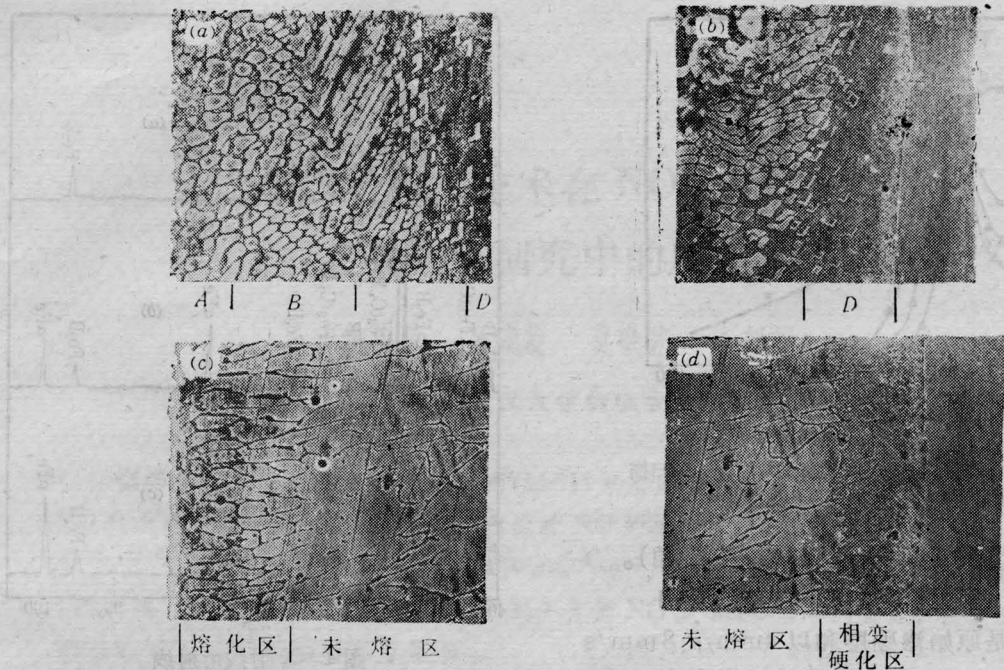


图 2 硼化层中 B 和 C 分布的俄歇扫描 ($\phi 595$) (a) 和 (b) 分别为照片 1 中 a 和 b 的部位和方向扫描



照片2 功率700W、光束直径3mm、扫描速度为8mm/s (a)和(b)和扫描速度为16mm/s(c)和(d)时熔区和相变硬化区的扫描电镜照片
(2%硝酸酒精腐蚀, ×1000)

尖和舌间的碳比基体高得多,而 Fe_2B 中几乎不含碳。因此,可以认为 Fe_2B 的形成过程是“排碳”过程。激光熔化过程一定会引起硼和碳浓度的再分布,这种再分布的情况取决于激光参数,并对熔融后共晶层中的组织结构和相分布以及性能产生影响。

经激光处理后渗硼层的显微组织的变化与激光扫描速率有关。当扫描速度较大时,硼化层部分熔化,其显微组织的变化如照片2中(c)和(d)所示。沿 Fe_2B 晶粒边界部分熔化,晶粒的取向改变不大。在未熔化区 Fe_2B 纵横扩展成连续的硼化层,舌尖变平。当 Fe_2B 纵横扩展时,会把舌间更多的碳推向硼化物的前沿,使之成为高碳区。急冷后前沿高碳区成为含有似针状马氏体和残余奥氏体(白色)组织的相变硬化区。当以8mm/s的较小速度扫描时,达到临界熔化,其显微组织如照片2中的(a)、(b)所示。很明显,在低速扫描下,被熔化的渗硼层,不仅取向完全破坏了,而且晶粒也细化了。晶粒为椭圆形,或

者是串珠状和纤维状。这些椭圆晶粒、串珠中的珠以及纤维晶,实际上是长宽比值很大的柱晶。串珠和纤维晶以及珠的长轴取向都和热流的方向一致,并向基体扩展。从照片中可以看出:熔区和未熔区、相变硬化区以及热影响区的界限是很分明的。

在部分熔化和完全熔化的硼化层中,没有发现显微裂纹,在相变硬化基体中也没有发现裂纹。这可能是在共晶熔化层中是以 $\alpha Fe(C, B)$ 为基的共晶混合组织。在部分熔化条件下的相变硬化区也没发现裂纹。这可能是由于硼化层在扩展过程“二次排碳”作用,使该区含碳量增高, M_s 点可能降到室温左右,急冷后而有大量的似残余奥氏体的白色组织,也没有出现裂纹。

在临界熔化区的前沿,有显明界线和大温度梯度区。可能是由于熔化过程使碳的浓度有所下降,使 M_s 点升高,急冷后产生更多的马氏体,造成更大的组织应力。加上界线两侧有较大的热应力。二者的叠加,可能导

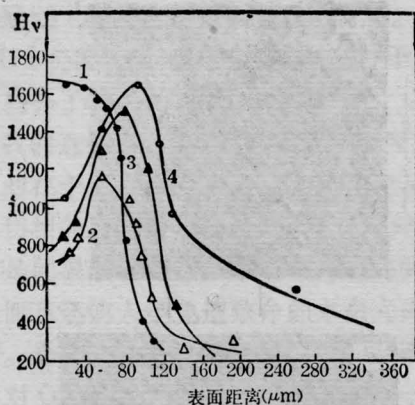


图3 硬度分布曲线

1—原始渗硼层；2—扫描速度 4 mm/s；3—扫描速度 8 mm/s；4—扫描速度 16 mm/s

致在该处出现的裂纹(照片 2(d) 右上角)。

3.3 扫描速度对硬度分布的影响

图 3 是原始渗硼层和以 4 mm/s、8 mm/s 和 16 mm/s 扫道上硬度随熔池深度的变化曲线。从图中可以看出：

1. 硼化层的激光熔化区硬度下降了，未熔区的扩展层硬度接近于原渗硼层的硬度，硬度向基体扩展，梯度减小。

2. 在以 4 mm/s 和以 8 mm/s 的临界扫描速度的条件下熔化层中出现硬度峰，峰高随扫描速度减低而降低，峰位则随扫描速度减低移向表面。在大于临界扫描速度的条件下，高硬度区是未熔化的扩展区。

3. 当扫描速度小于临界速度以后，熔区的硬度随扫描速度的降低而下降。

根据能谱分析，激光熔化后的硼化层中表面共晶层中铁和硼原子数之比约为 1.77 比 1，接近于 Fe_2B 的原子比；峰值所在的内层中的某一微区，铁与硼原子比约为 1.09 比 1，接近于 FeB 的原子比。X 射线分层分析进一步证明熔化层中有含 FeB 相的区段，如图 4(c) 就是该区段 X 射线衍射谱线，而该区段也恰好是硬度峰所在的区段。为了讨论 FeB 相出现的机理以及和碳分布的关系，有必要对原渗硼层中硼和碳的含量作一定量的概略估算：

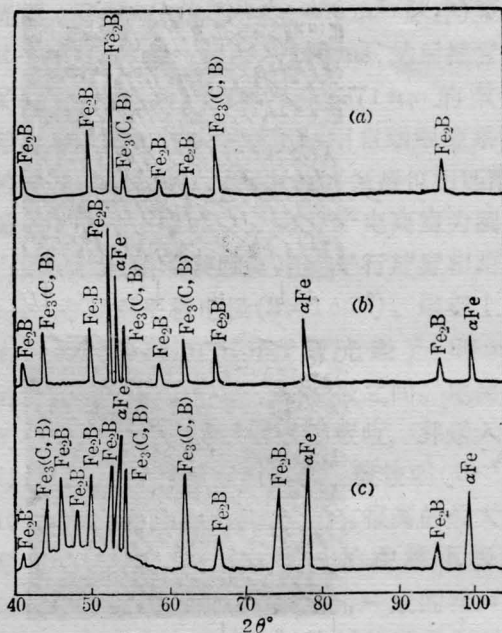


图 4 X 射线衍射线

(a) 原渗硼层；(b) 激光熔化后的表面层；(c) 激光熔化后的内层。 C_0K_{α}

最外层：设有 Fe_2B 95%， $Fe_3(C, B)$ 5%。 Fe_2B 理论含硼量为 8.84% (wt)； $Fe_3(C, B)$ 在 1000°C 时最大固溶硼量约为 5.3% (wt)^[3]。经激光熔化后：

$Fe_3(C, B)$ 5% 最大溶碳量约为 0.33% (wt)，由于 $Fe_3(C, B)$ 中的碳可被硼取代，实际含碳量可能低于此值。 $Fe_3(C, B)$ 5% 最大的溶硼量约为 0.27% (wt)； Fe_2B 95% 理论溶硼量约为 8.3% (wt)；所以表层总的含硼量约为 8.6% (wt)，含碳量约为 0.33% (wt)。总含硼量的估算与能谱分析的结果相符合。

根据俄歇分析表明，原始硼化层中的碳大部分富集于舌尖及舌间。激光熔化后的 X 射线分层分析也表明内层 $Fe_3(C, B)$ 的含量比外层多(如图 4(b)、(c) 谱线所示)，因此，设内层(即硬度所在的区段)含有 Fe_2B 85%， $Fe_3(C, B)$ 15%。激光熔化后： $Fe_3(C, B)$ 15% 最大的溶碳量约为 1.1% (wt)； $Fe_3(C, B)$ 15% 最大的溶硼量约为 0.81% (wt)； Fe_2B 85% 最大的理论溶硼量约为 7.5% (wt)；所

以该层总的含硼量约为 8.3% (wt), 含碳量约为 1.1% (wt)。

在激光熔化过程中外层可进入文献 [3] 1100°C Fe—B—C 三元相图 [3] 中的 Fe_2B + 液体的二相区, 冷却后形成 $Fe_2B + \alpha Fe(B) + Fe_3(C, B)$ 的 A 区段 (见照片 2(a)); 而内层可进入三元相图中的 $FeB + Fe_2B$ + 液体三相区或 FeB + 液体的二相区, 冷却后形成 $FeB + Fe_2B + \alpha Fe(B) + Fe_3(C, B)$ 的 B 区段。随着含碳量的增加, 照片 2(a) 中的 B 区段中 FeB 相对量也增加。C 区段和 D 区段由于单位体积中含硼量少, 所以没有 FeB 相。因此, 可把临界熔化层由表及里划分为四个区段 (照片 2(a)、(b) 中的 A, B, C, D) 即: A 区段: $\alpha Fe(B) + Fe_2B + Fe_3(C, B)$; B 区段: $\alpha Fe(B) + FeB + Fe_2B + Fe_3(C, B)$; C 区段: $\alpha Fe(B) + Fe_2B + Fe_3(C, B)$; D 区段: $Fe_2B + M$ (马氏体) + γ' (残余奥氏体) (未作分析)。

根据照片 2 中 (c)、(d) 两照片可以认为, 在激光的作用下, 硼化层在共熔前先经过扩展连续的“排碳”阶段, 使碳“上坡扩散”高度富集于扩展的硼化物前沿。硼化层熔化时, 碳作“下坡扩散”返回熔区。碳的返回扩散距离和扩散量取决于温度和时间, 在给定激光功率密度的条件下, 这两个因素都受激光扫描速度的控制。扫描速度越快, 碳的扩散距离越短, 扩散越不充分, 该区的含碳量越高,

熔融后含有 FeB 量也越多, 该区的平均硬度也越高, 该区距表面也越远。此外, 在临界熔化情况下, 由于扫描速度不同, 熔区温度的高低, 温度梯度的大小以及共晶转变的过冷度也都不同^[4~6], 共晶转变后晶粒的粗细和形态也都应不同。扫描速度低时, 共晶转变过冷小, 晶粒较粗; 扫描速度高时, 温度梯度及共晶转变的过冷度都较大, 除熔化不良区外, 晶粒都较细。越接近表面的熔区温度越高, 过冷度越小, 晶粒越粗。实验发现, 细晶区也是含 FeB 相比较多的区段, 也正是硬度峰所在的区段。

应当指出, 单相硼化层经激光熔化处理后出现了 FeB 相, 这是一般共晶化处理不能出现的现象。但是, 并非所有单相硼化的碳钢经激光扫描后都能出现 FeB 相, FeB 相的出现与否以及其数量和分布取决于钢中含碳量、硼化层的连续性和激光参数。

参 考 文 献

- 1 河上护。《铸造》, 1972; 25(3): 17~23.
- 2 片桐敏夫。《金属表面技术》, 1974; 22(5): 238~246
- 3 长谷部 *et al.* 《日本金属学会志》, 1974; 38(1): 46~54
- 4 Steen W M. *Metals Technology*, 1979; 6(12): 456~462
- 5 Strutt P R. *Materials Science Engineering*, 1980; 44: 239~250
- 6 Sun D K. *Metallurgical Transactions A*, 1983; 14 A(1~4): 643

输出能量 1.5J 的 $LiF:F_2^-$ 色心激光振荡

我们用 $\phi 8 \times 160$ mm 钹玻璃激光作为色心激光的纵向泵浦光源, 以 $30 \times 30 \times 2.5$ mm $LiF:F_2^-$ 色心晶体做调 Q 元件, 单脉冲输出时脉宽 200 ns, 多脉冲的脉宽为 0.8 ms, 能量为 10 J。大块优质 $LiF:F_2^-$ 色心激光晶体尺寸 $38 \times 47 \times 73$ mm, 谐振腔由二块平面介质反射镜构成, 在 $1.1 \sim 1.26 \mu m$ 波段范围内其反射率分别为 100% 和 8%。谐振腔长度约为 30 cm, $LiF:F_2^-$ 色心晶体在谐振腔内的安放位置与钹玻璃激光的倾斜角约为 4° 。 $LiF:F_2^-$ 色心激光振荡经 LN 晶体倍频, 调至具有明亮的 58 nm 黄色激

光光斑后, 接收 $LiF:F_2^-$ 色心脉冲宽带激光振荡的输出能量为 1.5 J, 光-光转换效率为 15%。

实验用 LiF 晶体是上海光学仪器研究所范福昌、金德荣提供的; 上海交通大学王苏伦、李胜华对晶体进行了光学加工和 $^{60}Co-\gamma$ 射线辐照着色; 上海工程技术大学朱卫祖与上海光机所张梅珍、张军昌以及李胜华等做了激光振荡实验。

(朱卫祖 张梅珍 范福昌 李胜华

1987年9月28日收稿)