

灰铸铁中石墨数量与形态对 激光热处理硬化带的影响

西安交通大学 周家瑾 王恩泽 (执笔) *

摘要: 本文通过改变灰铸铁的碳硅含量及冷却速度, 得到了具有不同原始组织的试样, 考察了原始组织的变化对激光处理硬化带深度和均匀性的影响, 结果表明: 随着碳含量的增加, 硬化带均匀性逐渐变差, 深度存在一个极大值, 冷却速度越大, 石墨越细小, 使硬化带深度减小, 均匀性变好。

Effects of the Graphite Amount and Shape on Hardened Band in Grey Iron Treated by Laser

Zhou Jiajin Wang Enze

(Xian Jiaotong University)

Synopsis: This paper indicates effects of C, Si contents and cooling rate on the depth and uniformity of Laser treated hardened band. The results show that as C content increasing, there is a maximum about the depth of hardened band, and the uniformity of hardened band becomes poor. As cooling rate increasing and the graphite flakes become smaller, the hardened band depth reduces, and the uniformity becomes good.

一、前言

用激光束作能源可以对材料表面进行硬化处理, 从而在材料表面得到一定间隔的硬化带, 硬化带的特征决定了激光处理效果的好坏, 它的宏观特征(为深度、均匀性、硬度等)与微观特征(如相组成与相结构等)主要取决于如下两方面: 一是材料的相变温度与材料内部的质量与热量的传递特性; 二是材料内部的温度分布, 材料的相变、质量、热量的传递特性与材料的组织特征有关; 而材料内部的温度分布则取决于激光处理参数和材料热学特性参数。由此可见, 材料的组织特征是其中较重要的因素, 因此, 本文试图通过改变灰铸铁的化学成分和冷却速度得到不同的原始组织, 来考察其对硬化带的影响。

二、试验条件与方法

在其它元素不变的情况下, 通过改变碳含量得到 A、B、C、D、E、F 六个试样, 每种成分都浇成如图 1 的阶梯试样, 以便能得到具有不同冷速的试样, 在每个试样的最厚台阶上取样作为考察碳量变化所带来的影响; 成分 D 为 HT200 所用的成分, 因此取样 D 上的三个台阶作为考察冷却速度变化所带来的影响; 试样都加工成 $30 \times 16 \times 12$ 的尺寸(图 2)经激

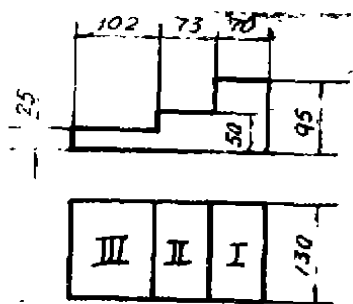


图 1 阶梯试样尺寸
Fig.1 Dimensions of the stair sample

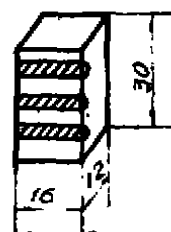


图 2 激光处理试样

Fig.2 The sample for Laser treatment

表 1 碳量的变化情况

Tab.1 Variation of C content

成份 \ 编号	A	B	C	D	E	F
C	2.43	2.81	3.21	3.48	3.53	3.73
Si	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35
Mn	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04

* 本校铸造专业 87 届本科生王飞雄, 88 届本科生牛正茂参加了本文的部分实验工作

光处理后对硬化带(图2中的阴影部分)进行分析,激光处理参数为:功率900W,扫描速度13mm/s,离焦量27.5mm,化学成分为表1所示。

三、实验结果与讨论

在常规热处理中,淬硬层深度是我们关心的主要指标之一,激光热处理也不例外,因为硬化层有足够的厚度往往是发挥其高硬度特性的一个必要条件,激光淬硬层深度主要取决于材料的原始组织,而常规热处理中淬硬层深度主要取决于材料中的合金元素^[1],因此,在我们考察原始组织对硬化带影响的时候,很自然硬化带深度就成为我们要考察的主要指标之一。另一方面,从实用角度来看,好的使用效果

不仅要求有足够厚的硬化层,也要求硬化层是均匀的,否则也会使硬化层的使用寿命受到影响。因此,在本工作中,我们主要考察碳量不同,冷却速度不同引起的材料组织上的变化对硬化带深度和均匀性的影响。

(一) 灰铸铁含碳量对硬化带深度的影响

在其它元素不变的情况下,随着含碳量的增加,灰铸铁中的石墨数量增多,通过定量金相分析,测定了石墨所占的面积百分比和单位面积上的石墨数量其结果见表2,经激光处理后,硬化带特征如图3a、b、c、d、e、f所示,由此看出,随着石墨数量增多,硬化带深度在成分D时达最高值,测得的硬化



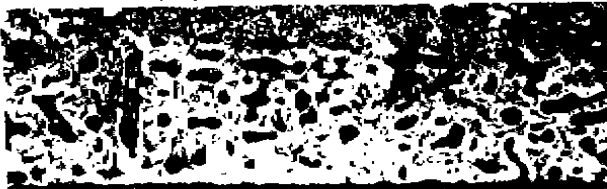
a 含碳2.43%试样硬化带特征,深度最大,均匀性最好。
a Characteristic of hardened band in 2.43% C with minimum depth, best uniformity



b 含碳2.81%试样硬化带特征,深度增加均匀性稍差。
b Characteristic of hardened band in 2.81% C with increasing depth poor uniformity



c 含碳3.21%试样硬化带特征,深度增加均匀性变差。
c Characteristic of hardened band in 3.21% C with increasing depth, poor uniformity



d 含碳3.48%试样硬化带特征,深度增加均匀性最差。
d Characteristic of hardened band in 3.48% C with maximum depth poor uniformity



e 含碳3.53%试样硬化带特征,深度减小,均匀性变差。
e Characteristic of hardened band in 3.53% C reduced depth poor uniformity



f 含碳3.73%试样硬化带特征,深度减小,均匀性变差。
f Characteristic of hardened band in 3.73% C reduced depth poor uniformity

图3 不同碳含量试样激光处理硬化带特征

Fig.3 Characteristics of hardened band in different C content

表2 不同含碳量下的石墨数量和硬化带深度

Tab.2 The graphite amount and the

depth of hardened band in different C content

编号	A	B	C	D	E	F
含碳量	2.43	2.81	3.21	3.48	3.53	3.73
石墨面积百分比%	6.4	9.7	12.7	13.0	13.7	14.7
石墨个数/mm ²	202	315	408	439	571	622
硬化带深度 10 ⁻² mm	8	14	24	27	25	22

带深度值示于表2中,将表2中的石墨面积百分比与硬化带深度的关系示于图4中,可以看出,硬化带深度随着石墨数量的增加存在一个极大值。为了说明产生这一现象的原因,我们作如下分析:

很显然,金属材料发生相变硬化的部分是材料表面温度超过奥氏体化温度的部分,也即硬化带的深度与材料的相变温度和材料内部的温度分布有关,而对于我们所用的灰铸铁材料,共晶反应时生成的奥氏体中的含碳量是相同的,材料碳含量的不同基本只反映

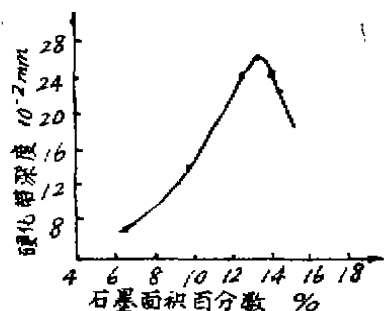


图4 硬化带深度随石墨数量的变化
Fig.4 The depth of hardened band as a function graphite amount

在石墨数量不同上,因此,灰铸铁在重新加热时转化为奥氏体的温度是不会随材料碳含量的变化而变化的,所以影响硬化带深度的因素只可能是材料内部温度分布,而在激光处理参数相同的情况下,材料内部温度分布只与材料的热学性能参数有关,热扩散系数 $\alpha = k / \rho C_p$ 是反映材料热学性能的综合指标,式中 k 为导热系数, ρ 为密度, C_p 为热容,因此,我们首先讨论一下石墨数量与热扩散系数 α 的关系。

由资料[2]知,石墨的导热系数 $k = 0.2$ 卡/cm·s, 灰铁的 $\rho = 7.215$ g/cm³, 热容 $C_p = 0.201$ 卡/g·°C, 则石墨的热扩散系数 $\alpha = 0.45$ cm²/s, 钢(可以近似看作灰铸铁基体) $k = 0.01$ 卡/cm·s·°C, $\rho = 7.85$ g/cm³, $C_p = 0.165$ 卡/g·°C, 则 $\alpha = 0.007$ cm²/s, 由此可见,石墨的热扩散系数比基体大得多,据此我们可以推断,灰铸铁的石墨越多,石墨的连续性越好,则材料的导热性越好,资料[3]指出的灰铁比球铁的热扩散系数大以及资料[2]中的灰铁的热扩散系数比钢的大得多的事实就证明了这一点,因此我们可以认为,按照试样编号 A, B, C, D, E, F 的顺序,随着石墨数量的增多,热扩散系数 α 是增加的,此外据文献[4]材料在激光束作用下的表面温度 T_s 由下式决定:

$$T_s = \frac{0.848 P_0}{\rho C_p \sqrt{D_0 V \alpha}} \quad (1)$$

式中 P_0 为材料的吸收功率, V 为扫描速度, D_0 为光斑直径, ρ 为材料密度, C_p 为材料热容,由此式可见,热扩散系数 α 的增加,总是使表面温度 T_s 下降的,这会带来两方面的效应,一是高的热扩散系数可使离表面较远的区域达到较高的温度,这是使硬化带深度增加的因素,二是由于 α 较大, T_s 下降,热分散的结果会使离表层一定区域内的温度降低,这是使硬化带深度减小的因素,这两种因素共同作用的结果会使 α 在某一值时硬化带深度达到最大值,图5的示意图可以把这种定性的解释进一步明了化,图中纵坐标为温度 T , 横坐标为离开表面的距离 X , 对于热扩

散系数分别为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 的三种材质,若 $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3$, 则其对应的温度分布曲线 T_1, T_2, T_3 在表面上 ($x=0$) 的温度是依次降低的,温度梯度也是减小的,如图5所示,若材料的奥氏体转变温度为 T_m , 则 T_m 与 T_1, T_2, T_3 的交点所对应的高表面的距离即为硬化层深度,如图5中的 x_1, x_2, x_3 , 由图知 $x_2 > x_1 > x_3$, 也即硬化带深度最大所对应的热扩散系数 α 只是中间某一热扩散系数值。

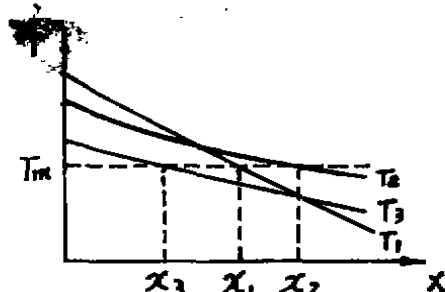


图5 温度分布示意图

Fig.5 The schematic of temperature distribution

2. 石墨数量对硬化带均匀性的影响

石墨数量不同的 A, B, C, D, E, F 试样经激光处理后的硬化带的特征如图3 a, b, c, d, e, f 所示,由此可以看出,原始组织中石墨数量越多,硬化带越不均匀。这里的不均匀有两方面的含义,一是指硬化带内部的组织特征,由图3可以看出,随原始组织中石墨数量增多,硬化带内的残留石墨也增多,二是指硬化带的轮廓,在石墨数量达到最高的 F 试样时,硬化带轮廓已经不是完整的月牙形了,出现这种变化的原因可从以下两方面来分析:

一方面与我们所采用的激光处理工艺有关,为了减少材料发生熔凝变化带来的复杂性,突出原始组织对硬化带深度与均匀性影响的重点,我们选择的激光处理工艺只能使材料发生相变硬化,而不发生熔化、再结晶,由于碳的原始状态以石墨存在,它在热力学上是稳定相,要通过它自身的扩散形成热力学上不稳定的碳化物是不可能的,它的一小部分可能通过扩散进入高温下稳定的奥氏体中,其余的碳则以石墨相存在,因此含碳量越高,原始组织中石墨越多,残存的石墨也就越多,这是使硬化带组织不均匀的一个方面,另一方面,石墨强的导热性也会引起硬化带的不均匀,在曾经作过的工作中,得到如图6示的一张照片,由此看出,在石墨周围有细小的碳化物生成,这说明了两个问题,一是石墨片周围的温度较高,因而可能在局部微区内发生熔化与凝固现象,这说明石墨的确是一个强的导热体;二是石墨片周围碳浓度高,以致快冷时出现了碳化物,由此我们可以推断,石墨数量越多,连续度越高,热量会越分散,这会使被加

热材料所能达到的最高温度降低, 由此会导致石墨

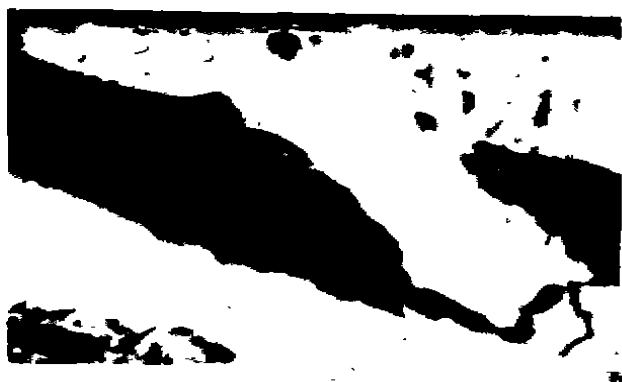


图6 石墨片周围的碳化物
Fig.6 The carbides around graphite flake

片中的碳向周围基体扩散的距离缩短, 因为温度越低, 碳越不容易扩散, 结果会使硬化区域只局限于石墨片周围很薄一层, 这是使硬化带内部不均匀的又一原因。此外, 热量沿石墨走向而集中, 这就导致了硬化带月牙形的不规则。

(二) 冷却速度对硬化带深度与均匀性的影响

编号为 D 的试样所浇注的三个台阶从厚到薄的编号分别为 D、D₁、D₂。随着冷却速度的增加, 石墨片数量增多而变得细小, 通过定量金相分析发现, 三个台阶试样中的石墨面积百分比都为 13%。但冷速大的试样中单位面积的石墨个数多得多, 为表 3 所示, 硬化层深度也示于表 3 中。将表 3 中单位面积内的石墨个数与硬化带深度的关系示于图 7 中, 可以看

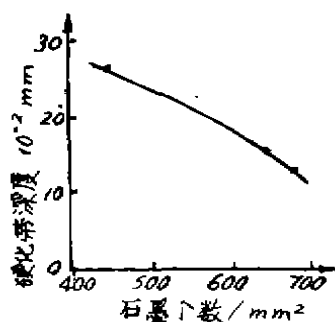


图7 硬化带深度随石墨个数的变化
Fig.7 The depth of hardened band as a function of graphite flake amount

出, 硬化带深度随冷却速度的增加, 即石墨的细化而减小, 而且均匀性变好 (如图 3d 及图 8a、b 所示), 我们认为产生这一现象的原因为: 石墨越粗大, 越长, 会把热量传得越远, 因此冷却速度低时形成的粗大石墨试样的硬化层深度较大; 另一方面, 粗大石墨要扩散开更难, 并且石墨片的间距较大, 离开石墨

片较远的地方碳不容易扩散到, 这都是引起硬化带不均匀的因素。此外热量传得较远使热量分散的结果会使材料所能达到的最高温度降低, 而对碳的扩散不利, 这也会导致硬化带不均匀。因此冷却速度越大, 石墨越细小, 硬化带越均匀。

表3 石墨个数与硬化带深度

Tab.3 Graphite flake amount and depths of hardened band

编号	D	D ₁	D ₂
石墨个数/mm ²	439	650	669
硬化层深度 10 ⁻² mm	27	15	12



a 阶梯中Ⅱ试样硬化带特征×50

a Hardened band characteristics at part II in stair sample



b. 阶梯中Ⅱ试样硬化带特征×50

b. Hardened band characteristics at part II in stair sample

图8 不同冷速引起的组织变化对硬化带的影响

Fig.8 Effects of structures in different cooling rate on hardened band

四、结论

本文通过改变碳量, 冷却速度得到了不同的灰铸铁原始组织, 考察了原始组织对激光处理硬化带深度与均匀性的影响, 得到以下几点认识:

1. 随碳量增加, 石墨数量增加, 材料热扩散系数 α 也增加, 这使得硬化带的均匀性变得越来越差, 硬化带深度随 α 的增加存在极大值。

2. 通过本工作推得的硬化带深度的表达式可看出, 硬化带深度是激光处理工艺参数, 材料热学特性参数及材料相变温度所组成的整个系统的函数。

3. 在相同的成分下, 即石墨含量相近时, 冷却速度越大, 石墨越细小, 使硬化带深度减小, 均匀性变好。

参考文献

- [1] 姚善长: 《金属热处理》1987, 2, P39
- [2] 俞景辉等译: 《冶金中的传热传质现象》, 冶金工业出版社出版 1981, P209
- [3] P.A.Molian et al: 《Journal of Engineering Materials and Technology》July 1986, Vol 108 P233~239
- [4] P.A.Molian et al: 《Journal of Engineering Materials and Technology》July 1986, Vol 108 P233~239, Re10