

文章编号: 1001-3806(2009)06-0586-04

低碳钢表面激光相变硬化研究

张培磊, 丁敏, 姚舜*, 姚成武

(上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室(筹), 上海 200240)

摘要: 为了研究不同激光功率及不同的冷却条件下, 激光相变硬化处理对低碳钢表面性能和组织的影响, 采用激光表面相变硬化方法, 在低碳钢表面获得了比原先母材硬度高 100HV ~ 150HV 的硬化层, 采用金相显微镜分析了激光处理区的组织, 且用显微硬度计测量了单道扫描时的纵向和横向的硬度分布。研究发现, 激光作用区主要是低碳板条马氏体与未转变的索氏体甚至屈氏体、回火索氏体组织。搭接区组织均为细小的马氏体及中间分布着索氏体组织; 由于 10CrNiMo 钢含碳量较低和碳扩散系数不同的原因, 其最高硬度层并未在表面形成, 而是形成在次表层。在软化区, 前一道扫描形成的马氏体受到回火作用, 原先固溶在马氏体中的碳析出, 形成了回火索氏体, 降低了硬度。结果表明, 激光相变硬化工艺可以将 10CrNiMo 钢的表面硬度提高 100HV ~ 150HV 左右, 且表面保持很好的韧性, 若想进一步提高其表面硬度, 还需采取熔覆等其它工艺。

关键词: 激光技术; 激光相变硬化; 低碳钢; 显微硬度

中图分类号: TG156.99

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.008

Research of laser transformation hardening on mild steel

ZHANG Pei-lei, DING Min, YAO Shun, YAO Cheng-wu

(Shanghai Key Laboratory of Material Laser Processing and Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The effect of laser transformation hardening on the surface property and microstructure of mild steel 10CrNiMo under different laser power and cooling conditions was studied. A hardened layer on the surface of the mild steel was obtained whose microhardness is 100HV ~ 150HV higher than that of the original mild steel. The microstructure of laser processed zone was observed with a metallographic microscope and the hardness of laser processed layer was measured with a microhardness tester. The results showed that the quench zone consisted of martensite, retained sorbite, troostite, tempered sorbite and that the microstructure in the lap zone was martensite and some sorbites locating in the middle of martensite. Because of the lower carbon content of steel 10CrNiMo and different carbon diffusion coefficient, the highest hardness did not appear on the surface but in the subsurface. In the softened zone, because the martensite produced by the first laser scanning was tempered by the second laser beam, the carbon in the martensite separates and changes into temper sorbite. Microhardness of lap zone declined due to the temper of second laser scanning. Laser transformation hardening can improve the surface hardness 100HV ~ 150HV higher and keep good tenacity. Furthermore, laser cladding can be taken to increase the hardness more evidently.

Key words: laser technique; laser transformation hardening; mild steel; microhardness

引言

10CrNiMo 钢的屈服强度 $\sigma_s \geq 800\text{MPa}$, 是我国研制的高强度、高韧性、可焊接的潜艇耐压壳体用钢^[1]。由于腐蚀和磨损均取决于材料表面的性能, 故经表面处理在 10CrNiMo 钢上形成更耐腐蚀和耐磨损的表层,

必将扩大 10CrNiMo 钢的应用范围, 提高其使用寿命及工作可靠性。激光相变硬化是目前激光表面改性的热点之一, 在工模具、机械制造、航空航天、铁道运输等领域得以广泛应用^[2-6], 一般激光相变硬化处理所针对的工件材料多为中碳素钢、高碳钢、铸铁或合金钢, 材料在进行激光相变硬化时本身具有相变硬化能力及足够的激冷能力, 但对于类似 980 超高强度低碳钢的激光强化研究很少。本文中通过用不同功率的激光对 10CrNiMo 钢进行表面相变硬化处理, 再通过不同冷却方式, 分析其处理后组织, 探讨了激光功率大小对 10CrNiMo 钢处理后硬化层区域面积、微观组织和硬度的影响, 以考证其激光自淬性。

基金项目: 国家科技部国际科技合作资助项目(2006DFB52680); 上海市科委国际合作资助项目(061107030)

作者简介: 张培磊(1981-), 男, 博士研究生, 现主要从事激光表面强化研究。

* 通讯联系人。E-mail: ys@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2008-09-07; 收到修改稿日期: 2008-11-26

1 试验材料、设备及方法

本试验材料 10CrNiMo 钢板厚度为 5mm, 其主要成分如表 1 所示^[1]。

Table 1 The chemical composition of steel 10CrNiMo (mass fraction)

w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Ni)	w(Cr)	w(Mo)
0.0009 ~ 0.0013	0.0018 ~ 0.0031	0.0054 ~ 0.0060	≤ 0.00011	≤ 0.00010	0.044 ~ 0.0454	0.0053 ~ 0.0068	0.0036 ~ 0.0044

吸收涂层, 其含有滑石、炭黑等, 吸收率可以达到 90% 以上。并在处理时侧吹氩气保护防止试样的高温氧化。冷却条件分为空冷和水冷两种, 水冷时将试板浸入水中, 水漫至距试板表面 1mm 处。激光功率分别为 4kW, 4.5kW, 5kW 和 5.5kW, 光斑直径为 5mm, 扫描速度为 3m/min。使用 HX-1000 显微硬度计测定激光相变硬化区的显微硬度, 载荷砝码 1000g, 加载时间 40s。

2 实验结果及分析

2.1 激光功率对相变硬化处理区域的影响

在其它参量相同的情况下, 随着激光功率的增加, 硬化层宽度和深度在空冷和水冷的条件下都是增加的, 结果如图 1 所示。这是因为当光斑尺寸和扫描速度一定时, 工件表面的最大加热时间也是恒定的。当激光功率增大时, 光斑的平均功率密度增加, 金属表面

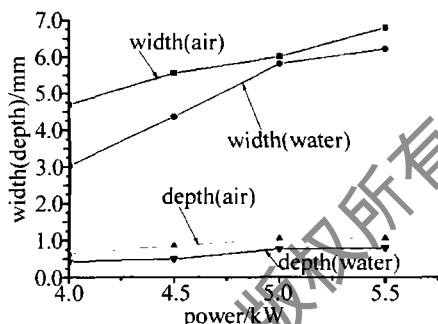


Fig. 1 The width and depth of quenching zone under different laser power

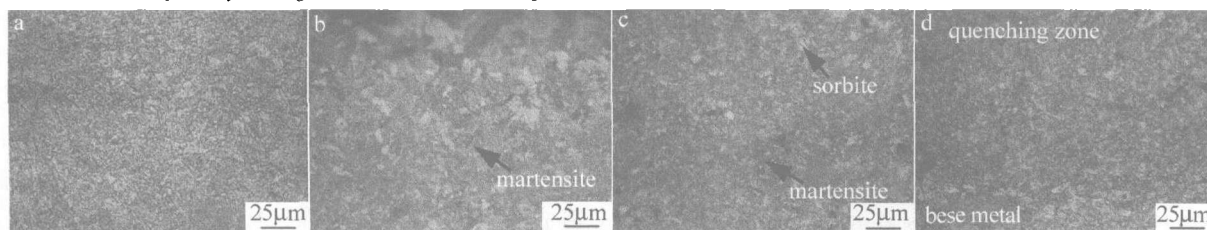


Fig. 2 The microstructure of steel 10CrNiMo and the microstructure from surface to interior of steel after 5kW laser processing under water-cooling condition
a—steel 10CrNiMo b—surface c—middle of quenching zone d—interface of quenching zone and base

已降至奥氏体 1 线以下, 原始组织将发生高温回火转变形成回火索氏体组织和屈氏体, 组织见图 2d。

空冷条件下, 功率为 4kW 时, 硬化层内形成的马氏体尺寸较小, 且含有少量的未转变的索氏体; 随着激光功率的增大, 马氏体组织的尺寸增大且数量增多, 组织见图 3。

本实验中的激光发生器是由德国 TRUMPF 生产的 TLF15000 turbo 快速轴流型激光器, 最大输出功率为 15000W。为了改善试样对激光的吸收效率, 保护试样表面不被氧化, 处理前在试样表面涂敷了自制

吸收的能量也增大, 使得表面温度进一步提高, 经过金属基体的快速热传递, 金属表层下处于相变温度奥氏体 1 以上的区域增大, 从而导致硬化层深度和宽度增加。又因为在相同的热输入时, 水冷时由于基体传热更快, 其宽度和深度都比空冷时要小。

2.2 激光相变硬化组织

10CrNiMo 钢母材组织见图 2a, 在白色基体中间断断续续分布着黑色小点, 且呈片状分布, 为索氏体组织。由于激光作用区温度呈径向梯度分布, 硬化区组织沿层深方向发生了明显变化。根据 Fe-C 相图及低碳钢热处理原理, 可将激光作用区大致分为 3 层: 第 1 层为表面完全淬硬层, 这一层主要是由激光加热试样到奥氏体 3 温度以上, 发生奥氏体化, 其在随后的快速冷却过程中形成以低碳板条马氏体为主的组织, 因为其原始母材碳和合金元素含量很低, 故未发现残余奥氏体, 且马氏体组织由表向内逐渐变小, 这可能是因为表面的过热度大, 引起奥氏体晶粒有一定的长大所致, 组织见图 2b。第 2 层为过渡区, 这一层主要是加热温度在奥氏体 1 ~ 奥氏体 3 温度之间, 过热度低, 温度梯度小, 作用时间短, 索氏体中的铁素体向奥氏体转变和碳的溶解均不充分, 且因为 10CrNiMo 钢原始组织就是极细小的索氏体组织, 所以, 经马氏体相变会形成细小的低碳板条马氏体组织与未转变的索氏体甚至屈氏体, 组织见图 2c; 第 3 层为高温回火区, 由于加热温度

搭接区为激光处理时, 第 2 道处理区与第 1 道处理区的重叠区。搭接区由于受到第 2 次激光加热的作用, 回火软化造成的软化带, 使得被处理工件表面的硬度分布不一致, 影响工件的耐磨性和使用寿命。在 $P = 5kW$, $v = 3m/min$ 时, 进行两道搭接扫描, 搭接率为 20%, 搭接区显微组织如图 4 所示。可以看到, 搭接区

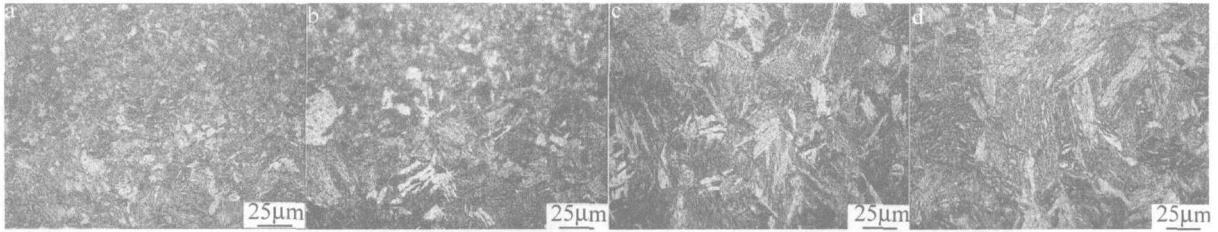


Fig. 3 The microstructure on surface of quenching zone under air-cooling condition and different laser power
a—4kW b—4.5kW c—5kW d—5.5kW

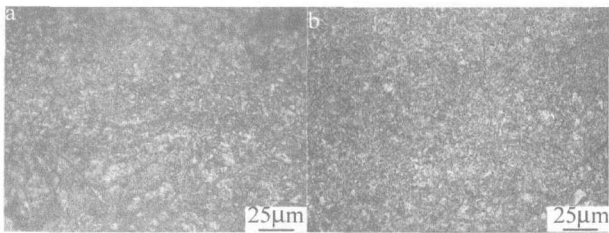


Fig. 4 The microstructure of lap zone
a—under air-cooling condition b—under water-cooling condition

组织均为细小的马氏体组织及中间分布着索氏体;空冷时的组织比水冷时组织略为粗大,这是因为其冷却速度要稍微大于空冷,其过热度较小,奥氏体长大有限导致的。

2.3 显微硬度

对于激光相变硬化后的试样硬度主要取决于处理后的组织中马氏体含量和马氏体中的含碳量以及处理后组织大小。由于母材为低碳低合金钢,含碳的质量分数仅为0.0009~0.0013,其淬火后形成的马氏体为低碳板条马氏体。在两种不同冷却条件下,基本硬度变化曲线趋势基本一致,如图5所示。对于其表面硬度较低,而后又上升是因为其中碳扩散的原因。在基

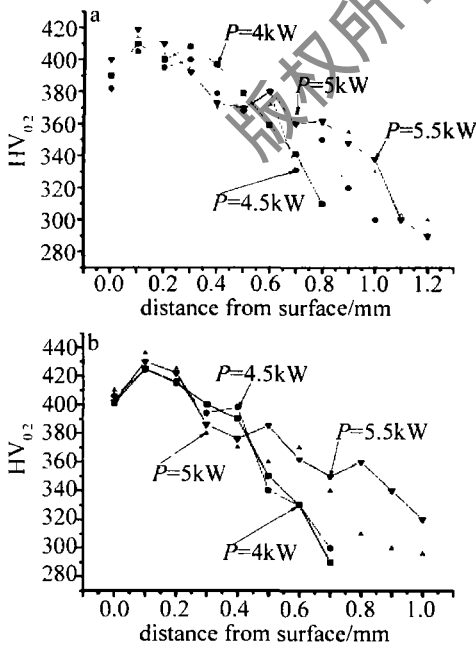


Fig. 5 The microhardness in the direction of thickness under air and water-cooling condition
a—air-cooling b—water-cooling

模激光以功率 P 、速度 v 扫描时,在任意一时刻 τ 时,其试板 3 维温度场分布可以用下式表示^[7,8]:

$$T(x, y, z, \tau, v) - T_0 = \frac{2\rho_0 P \sqrt{\alpha}}{\kappa \prod (\tau - t)^{\frac{3}{2}}} \int_0^\tau \frac{\exp\left[-2 \frac{(x - vt)^2 + y^2}{8\alpha(\tau - t) + w^2} - \frac{z^2}{4\alpha(\tau - t)}\right]}{\sqrt{\tau - t} [8\alpha(\tau - t) + w^2]} dt \quad (1)$$

式中, x, y, z 是 3 维坐标轴, w 是激光的作用半径, ρ_0 是材料吸收率, κ 是材料的热导率, $\alpha = \kappa / (\rho c)$ (ρ 是密度, c 是比热容), T_0 是试板初始温度。

可以知道,同一时刻,在材料沿深度方向上,距离表面近的材料温度高,且由于材料本身的导热,材料内部冷却快,靠近表面的材料因为主要靠向空气散热,所以其散热慢,故其经历的高温时间也是最长的。激光加热时,碳的扩散对以后的组织和硬度起着很大的作用,碳在奥氏体中的扩散速度系数可以由阿累尼乌斯公式计算得:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中, D 为碳在奥氏体中的扩散系数, D_0 是扩散常数, Q 为碳原子在奥氏体中的扩散激活能, R 为气体常数。其值为 $8.314 \text{ J} / (\text{mol} \cdot \text{K})$, T 为绝对温度。

可以知道,温度升高,扩散速度增大。激光快速加热时,温度高的部位碳的扩散快。10CrNiMo 钢原始组织是索氏体,即为铁素体和渗碳体,加热形成奥氏体时,材料表面的碳向周围扩散的比内部的多,所以,虽然在淬火后的组织中其马氏体体积分数大,但马氏体中含碳量低,其畸变较小导致硬度较低。反之,在距离表面较深处,索氏体在形成奥氏体时,碳的扩散很少,虽然淬火后组织中马氏体含量较少,但是其含碳量高,造成畸变较大,硬度也高。所以,最高硬度层并未在表面形成,而是在次表层。

搭接区位置如图 6 所示,由于第 1 道扫描对第 2

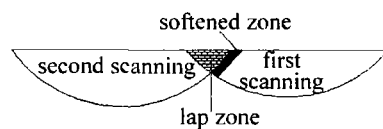


Fig. 6 Sketch map of lap

道有预热作用,一般第 2 道的硬化区域要大于第 1 道。硬度测试从第 2 道硬化层左边缘开始,其显微硬度变

化曲线如图7所示。根据之前的组织分析,在搭接区

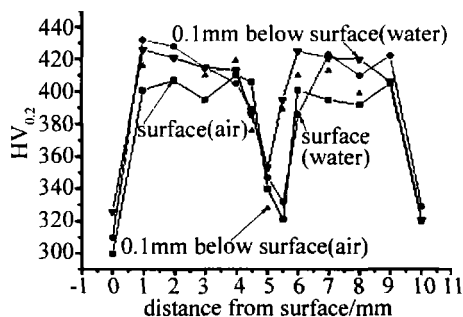


Fig. 7 The microhardness on surface and subsurface of lap zone under air and water-cooling condition

的马氏体由于激光重复加热,又形成了马氏体,其硬度下降不大;而在搭接区附近的软化区,前一道扫描形成的马氏体受到回火作用,在原始组织较低的碳含量基础上,原先固溶在马氏体中的碳析出,形成了回火索氏体,进一步降低了低碳马氏体的硬度。在距离表面0.1mm处测的显微硬度曲线,发现其与表面硬度变化类似。

3 结论

(1)在相同的热输入时,水冷时由于基体传热更快,其宽度和深度都比空冷时要小。

(2)激光作用区大致分为3层:第1层为表面完全淬硬层,主要是低碳板条马氏体,且马氏体组织由表向内逐渐变小;第2层为过渡区,主要是形成细小的低碳板条马氏体组织与未转变的索氏体甚至屈氏体;第3层为高温回火区,形成回火索氏体组织和屈氏体。

(3)空冷条件下,功率为4kW时,硬化层内形成的马氏体尺寸较小,且含有少量的未转变的索氏体;随着激光功率的增大,马氏体组织的尺寸增大且数量增多。

(4)在两种不同冷却条件下,基本硬度变化曲线

趋势基本一致。对于其表面硬度较低,而后又上升的是因为表面温度较高,碳扩散较快的原因;软化区的硬度由于激光重新扫描导致的回火而下降。

(5)由于10CrNiMo钢的碳和合金元素含量较低,激光相变硬化工艺可以将其表面硬度提高100HV~150HV左右,且表面保持很好的韧性,若想进一步提高其表面硬度,还需采取熔覆等其它工艺。

参 考 文 献

- [1] ZHANG F J, BU D X, ZHANG G D, *et al.* Ultra-narrow gap gas-shield metal arc welding of 980 steel [J]. *Electric Welding Machine*, 2006 (5): 51-54 (in Chinese).
- [2] LI T D, WANG Y, HE Q K, *et al.* Study on microstructure and performance of 45 steel treated by multi-time laser transformation hardening [J]. *China Surface Engineering*, 2007, 20 (2): 33-37 (in Chinese).
- [3] CHAO M J, DU Y D, LIANG E J, *et al.* Investigation of laser surface hardening for mould-cutting roller [J]. *Laser Technology*, 2003, 27 (6): 500-503 (in Chinese).
- [4] XU Z W, HUANG Z H, RU A, *et al.* Law of microstructural formation of low carbon steel in laser melting process and heating transformation of the melted microstructure [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2003, 28 (10): 22-25 (in Chinese).
- [5] MA K, YANG Y L, WANG Ch Sh, *et al.* Effect of laser hardening technical parameters on hardened depth of 40Cr steel [J]. *Laser Technology*, 2002, 26 (4): 262-263 (in Chinese).
- [6] WU G, SONG G M, HUANG W J. Influence of laser processing parameters on the case-depth and the hardness [J]. *Laser Technology*, 2007, 31 (4): 163-165 (in Chinese).
- [7] LI J Ch. Research on optimization of controlling of laser heat treatment [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 155-160 (in Chinese).
- [8] MIKOVIC T, SCHULZE V, LOHE D, *et al.* Influence of heating rate, cooling rate and number of pulses on the microstructure of AISI 4140 after short-time-hardening [J]. *International Journal of Materials Product Technology*, 2005, 24 (1/4): 207-230.
- [9] (上接第585页)
- [10] MATLAB的环境下运行是下一步将要解决的问题。
- [1] BUTTERS J N, LEENDERTZ J A. Speckle pattern and holographic techniques in engineering metrology [J]. *Opt & Laser Technol*, 1971, 3 (1): 26-30.
- [2] CHENG H Y, LUO Q M, ZENG S, *et al.* Modified laser speckle imaging method with improved spatial resolution [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2003, 8 (3): 559-564.
- [3] WANG K F, TIEU A K, LI E B. Comprehensive influence of in-plane displacement, double-aperture orientation and wedge-shearing direction on slope fringe formation in speckle shearing interferometry [J]. *Journal of Modern Optics*, 2003, 50 (9): 1365-1372.
- [4] WANG K F, TIEU A K. Influence of in-plane displacement on slope fringe formation in electronic speckle shearing interferometry [J]. *Opt Commun*, 2003, 224 (13): 45-49.
- [5] WANG K F, TIEU A K. Volume-grating phase-shifting digital speckle pattern interferometry used for measurement of out-of-plane displacement field [J]. *Opt & Laser Technol*, 2004, 36 (2): 117-120.
- [6] LIN G, WANG L X, ZHANG L J. LabVIEW 8.2 programme and application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 6-25 (in Chinese).
- [7] ZHANG L K. MATLAB 7.0 introduction and conversance [M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2006: 391-433 (in Chinese).
- [8] YU J W. A system of image processing based on ESPI [J]. *Information Technology*, 2003, 27 (4): 41-43 (in Chinese).
- [9] CHEN H P. Research on speckle interferometry technology and image processing system [D]. Guangzhou: Guangzhou University of Technology, 2004: 1-45 (in Chinese).
- [10] LUO J H, FENG P. Application of MATLAB 7.0 in image processing [M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 188-200 (in Chinese).