

冲压模具激光表面强化的搭接工艺研究

王恒海, 虞钢, 党刚, 何秀丽

(中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190)

摘要: 针对激光相变强化搭接带存在的回火软化等问题,对激光强化的球墨铸铁材料 QT700-2 搭接区的显微硬度、表面粗糙度、物相变化等进行了测试,并分析了强化机理。结果表明:选用合理的搭接率等工艺参数,球墨铸铁激光搭接强化后的硬度可达到 50HRC 以上,调节搭接宽度可以避免搭接区的回火软化问题。多道搭接强化后表层的马氏体组织呈区域性交错分布,材料表面形成非均匀、多尺度强化结构,强化后的表面具有良好的耐磨性和耐疲劳性。通过上述结果,对材料激光搭接强化的工艺参数进行了合理的优化。

关键词: 脉冲激光相变强化; 搭接工艺; 球墨铸铁 QT700-2; 强化带

中图分类号: TG156.99; TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-6264(2008)06-0168-05

Study on overlapping process in laser transformation hardening of stamping die

WANG Heng-hai, YU Gang, DANG Gang, HE Xiur-li

(Key Lab of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Microhardness, surface roughness and phase transformation of overlapping zone in multi-track laser hardening on a ductile cast iron QT700-2 were tested. The experimental results show that with proper processing parameters, the microhardness of treated layer can be higher than 50HRC. The temper softening in overlapping zone can be prevented by changing the overlapping ratio. The interlaced distribution of martensite and non-uniform, multi-scale structure in hardened zone after multi-track laser hardening led to a good wear and fatigue resistance of surface. Processing parameters of laser hardening on ductile cast iron were optimized.

Key words: pulsed laser transformation hardening; overlapping process; ductile cast iron QT700-2; hardened band

与传统的淬火硬化相比,激光相变强化具有输入能量密度高,能使金属表面快速升温到相变温度而形成奥氏体的特点^[1],因此可以大大提高金属表面性能。但通常激光相变强化带的尺寸远小于工件尺寸,对大面积表面进行激光相变强化一般需要通过强化带搭接来实现。强化带搭接是比较复杂的问题,搭接区常常出现软化现象等,使得强化均匀性难以保证,严重影响强化质量。

国内外很多研究者在冲压模具激光相变强化的研究中,都遇到了强化带搭接区软化的问题^[2-4]。文献[2]利用 CO₂ 激光器选取不同的搭接率对 CK60 材

料进行了相变强化研究,结果显示搭接区为低硬度区,说明该区域产生了软化现象;文献[3]对模具表面进行激光强化实验,发现当取一定激光处理交叠量时,硬化带的硬度在交叠区出现有一较窄区域的回落现象。同时发现,如果激光束交叠量选取适当时,可以使硬度回落区缩小;文献[4]对大型汽车覆盖件拉深模具进行激光表面强化实验研究时同样遇到强化带搭接区软化问题。从对冲压模具的激光相变强化研究和应用现状来看,强化带搭接区的软化问题尚没有得到比较满意的解决。

本文针对激光相变强化搭接带存在的软化等问题,利用集成化激光制造系统^[5]进行了系统的激光强化搭接实验,通过对实验结果的分析研究了激光搭接强化 QT700-2 铸铁材料搭接宽度和扫描速度等工艺参数与强化后表面硬度和粗糙度的关系;进行了多道搭接实验并对强化层的显微硬度分布和物相变化等进行了测试和分析;找出了激光搭接强化 QT700-2 铸铁材料合理的工艺参数,为实际应用中激光强化工艺

收稿日期: 2007-11-07; 修订日期: 2008-09-24

作者简介: 王恒海(1982—),男,中国科学院力学所在读博士,从事激光与材料相互作用的实验和数值模拟研究, Tel: 010-82544251, E-mail: whhairay@163.com。

通讯作者: 虞钢(1958—),博士生导师,主要从事激光与材料相互作用及其应用研究, E-mail: gyu@imech.ac.cn, Tel: 010-82544250。

参数的制定提供了实验参照。

1 实验材料和方法

为了研究激光相变强化 QT700-2 铸铁材料不同工艺参数对搭接区强化效果的影响,并找到合理的强

化搭接工艺参数以满足实际工业生产的要求,进行了激光相变强化双道搭接实验,并调整合适的工艺参数进行了多道搭接研究。

实验采用 3kW 连续固体激光器,模具材料为球墨铸铁材料 QT700-2,化学成分见表 1。

表 1 实验材料的化学成分(wt%)

Table 1 Composition of experimental material (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Mg	Mb	Re	Cu	Fe
3.7~4.0	2.3~2.6	0.5~0.8	<0.1	0.02	0.035~0.065	0.15~0.4	0.035~0.065	0.4~0.8	Bal.

强化搭接实验示意图如图 1,实验中主要通过调节激光给进速率以控制表面峰值温度,应使 $V_i < V_{i+1}$,从而避免出现熔化。同时需要选择合适的搭接宽度来避免软化。

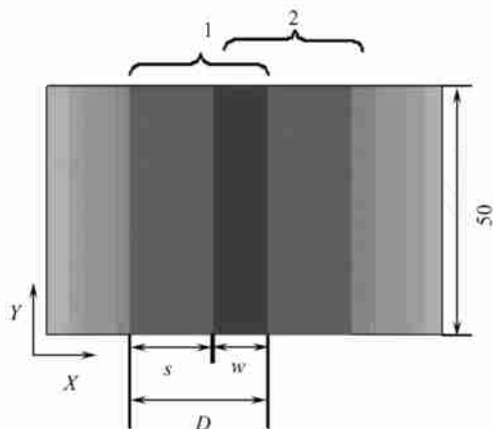


图 1 强化搭接实验示意图

Fig. 1 Sketch diagram of laser hardening
laser power: $P(W)$; defocus distance: $f(mm)$;
beam size: $D(mm)$; scan speed: $V_i(mm/s)$;
step length: $s(mm)$; overlapping width: $w(mm)$

对强化后的试样表面进行了显微硬度和粗糙度进行了测试,在 HXD-1000 型显微硬度计上进行硬度沿层深方向的分布及硬度在硬化层上的二维分布测定,具体方法为:在强化层的搭接区横截面上按 $100\mu m \times 50\mu m$ 进行网格划分,利用显微硬度计沿层深方向按列对每一个网格的交叉点进行硬度测试,每一列测试直至硬度值达到 200HV 左右(基体硬度)为止。然后,以网格的长度和宽度分别为 x 、 y 坐标轴,绘制显微硬度的二维统计分布图。显微硬度测试加载载荷 50kg,加载时间为 15s。采用 TIME RM-20 型粗糙度测定仪测定表面粗糙度。利用金相显微镜对处理后的组织、层深进行观察。

2 实验结果和讨论

材料经过激光强化以后,表面有氧化物生成,形成氧化膜。氧化膜对激光的吸收率比原始材料大,相当于对材料表面有黑化的作用。另一方面,材料经过激光作用以后,虽然降温速率很快,但仍会有余热存在。材料对激光的吸收率通常随温度的升高而增大。综合上面两方面因素,当激光经过下一条强化带时,前后两条强化带搭接区的吸收率会增大,增幅远大于非搭接区。因此在搭接区容易出现峰值温度过高而产生熔化。材料经过一次强化后,强化层的材料组织已经发生了变化。当激光沿下一条强化路径对搭接区的材料再一次强化时,材料的组织演化规律将发生变化。对于以珠光体为主的球墨铸铁材料 QT700-2,强化前材料组织主要是珠光体与少量铁素体,强化以后组织成分包括马氏体、残余奥氏体、残余铁素体和莱氏体。当强化后组织再经过一次热循环时,温度超过相变温度 A_{c1} 的区域将重新结晶硬化。而未超过 A_{c1} 的区域,前一次形成的硬化组织发生快速回火现象,硬度反而会降低。

通过对实验结果进行分析,以期对激光搭接强化 QT700-2 铸铁材料的工艺参数进行合理的优化,从而找到解决上述搭接区问题的方法。

2.1 双道搭接实验结果分析

通过对实验结果的分析,对比了不同搭接宽度和激光扫描速度下激光强化的效果。

(1) 搭接宽度与表面硬度及粗糙度的关系

实验参数:激光功率为 1100W,离焦量为 55mm,光斑直径为 10mm,第一条与第二条强化带扫描速度分别为 3.2mm/s 和 3.5mm/s。选用不同的搭接率进行实验。搭接率为搭接宽度与光斑直径之比。

图 2(a) 为激光强化搭接率与搭接区表面平均硬度曲线图,从图中可以看出,只要选用合理的工艺参

数,激光强化搭接区的硬度可以达到 50HRC 以上,满足工业生产的要求。若搭接宽度选用不合理,搭接区会出现软化现象。因此,可以通过调整搭接区宽度使搭接区达到良好的强化效果。在其他工艺参数不变的情况下,搭接宽度增大,搭接区硬度增大。

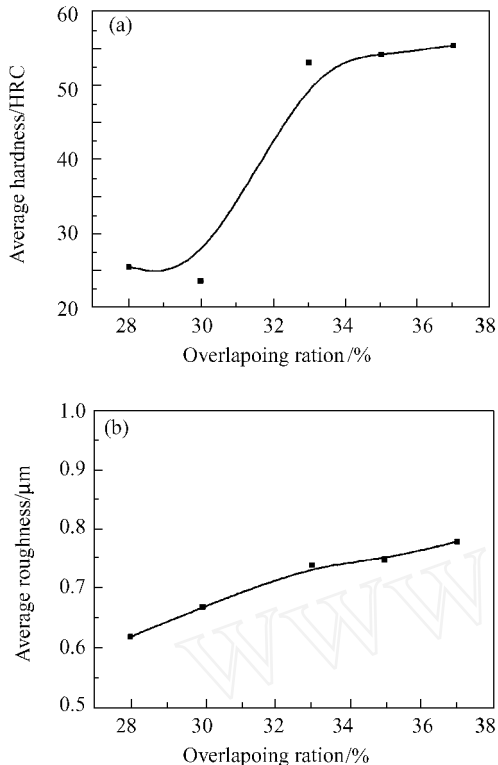


图 2 激光强化搭接率与搭接区表面平均硬度、平均粗糙度曲线图

Fig. 2 Relation between overlapping ratio and surface hardness, surface roughness

图 2(b) 为激光强化搭接率与搭接区平均粗糙度曲线图,从图中可以看出强化后表面粗糙度 R_a 都在 0.6 与 0.8 之间,满足工业生产要求;在其他工艺参数不变的情况下,搭接宽度增大,搭接区粗糙度增大。

(2) 第一条强化带与第二条强化带速度比与搭接区平均硬度及粗糙度的关系

试验参数:激光功率为 1100W,离量为 55mm,光斑直径为 10mm,搭接宽度为 3.5mm。选用不同的扫描速度进行实验。比较第一条与第二条扫描速度之比与实验结果的关系。

图 3(a) 为两条强化带速度比与搭接区平均硬度曲线图,可以看出激光强化后搭接区硬度都在 50HRC 以上,在其他参数不变的条件下,第一条强化带与第二条强化带速度比增大,搭接区硬度减小。

图 3(b) 为两条强化带速度比与搭接区平均粗糙

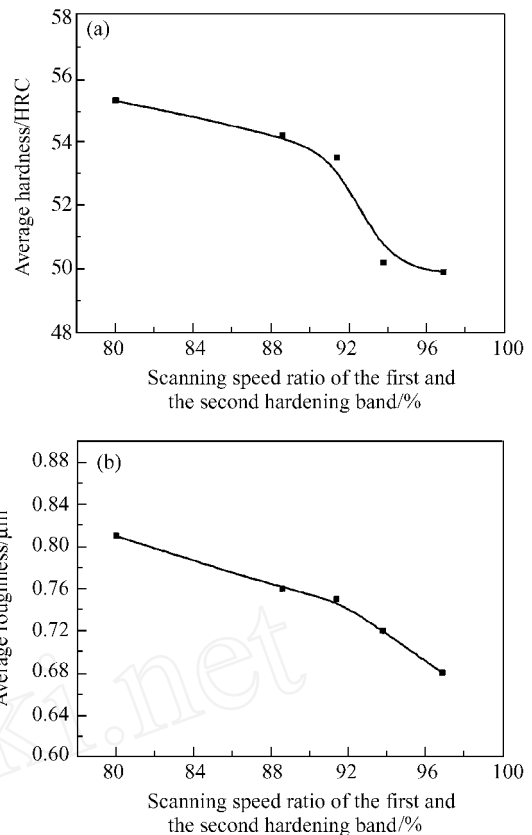


图 3 两条强化带速度比与搭接区平均硬度、平均粗糙度曲线图

Fig. 3 Relation between scanning speed ratio and surface hardness, surface roughness

度曲线图,从图中可以看出强化后表面粗糙度 R_a 都在 0.6 与 0.8 之间,满足工业生产要求;在其他工艺参数不变的情况下,第一条强化带与第二条强化带速度比增大,搭接区粗糙度减小。

2.2 激光相变强化多道搭接实例及结果分析

连续激光相变强化多次搭接实验采用的工艺参数为:激光功率为 1100W,离量为 55mm,光斑直径为 10mm,搭接宽度为 3.5mm。扫描速度见表 2。

表 2 综合方案扫描速度表

No.	1	2	3	4	5	6
Scanning speeds/(mm/s)	3.0	3.0	3.2	3.3	3.4	3.6

强化后材料表面实物图如图 4 所示。

对强化面的表面硬度和粗糙度的测试结果显示整个强化面的硬度均在 50HRC 以上,每一条强化带或搭接带上硬度变化不大。图 5 给出了其中一条搭

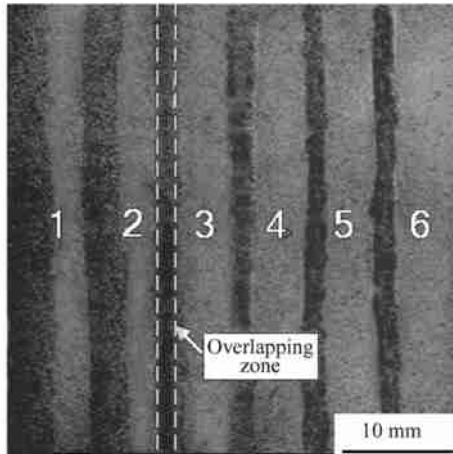


图 4 强化表面实物图

Fig. 4 Laser hardening surface with overlapping zone

接带的表面硬度分布。图 6(a) 是 5 条横向路径示意图, 图 6(b) 是沿 X 轴的表面硬度分布图。图 7 是按 5 条横向路径测定的沿 X 轴的粗糙度分布图。

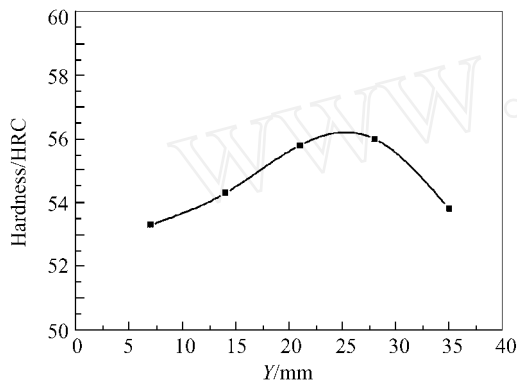


图 5 强化面沿 Y 轴硬度分布图

Fig. 5 Surface hardness along Y axis

从图 5 可以看到, 每一条搭接带硬度分布比较均匀。从图 6 中可以看到, 强化表面沿 X 轴的硬度分布曲线呈波浪型, 其中每条分布曲线都有 5 个波峰, 而波峰所对应的位置均为强化带搭接区。也就是说强化带搭接区不仅没有出现软化, 其硬度还普遍比非搭接区高, 获得了较好的组织性能。从图 7 中可以看到, 整个强化面的粗糙度均在 R_a 0.6 ~ 0.95 μm 之间, 满足工艺要求。

实验后取强化带搭接区小试样进行金相试验, 强化层形貌如图 8 所示。

从图 8 中可以看出, 与通常的“月牙形”强化层相比^[6], 经过搭接以后的强化层呈波浪形, 两条强化带的“月牙形”强化层在边缘位置重叠使月牙形边缘的层深加深。图 9 是强化层的 OM 照片, 从图中可以看

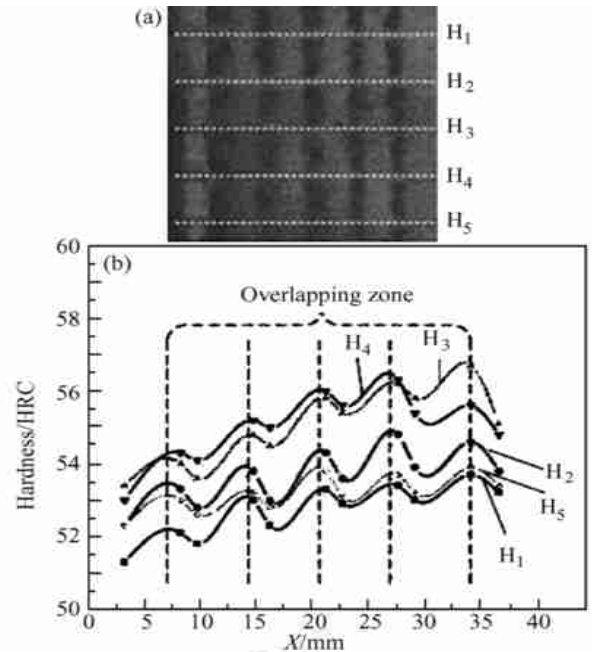


图 6 强化面沿 X 轴表面硬度分布图

Fig. 6 Surface hardness along X axis

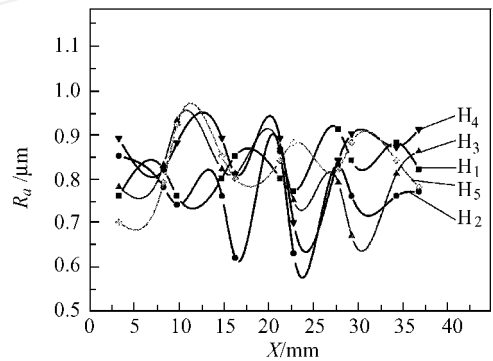


图 7 强化面沿 X 轴表面粗糙度分布图

Fig. 7 Surface roughness along X axis

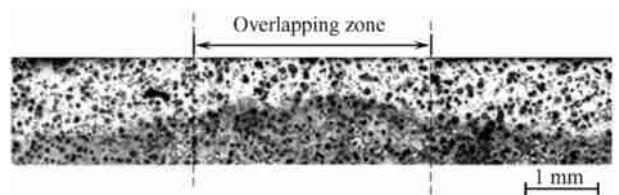


图 8 强化层形貌图

Fig. 8 Microstructure of hardened layer

到, 强化后石墨球周围主要为针状马氏体组织, 马氏体组织较硬, 是强化硬度提高的主要原因。

从图 8 和图 9 中可以看到整个强化区的组织结构分布具有明显的不均匀性、交错性和多尺度特征, 为搞清楚微结构的分布规律, 还需要对强化层的显微

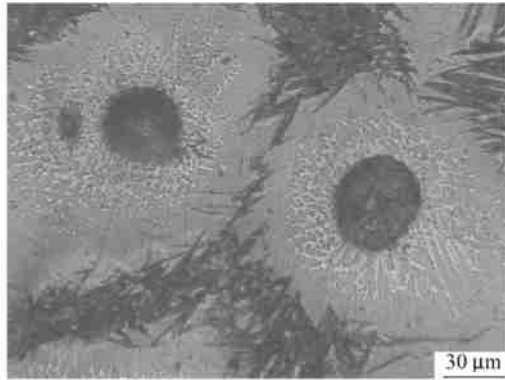


图 9 强化层显微组织

Fig. 9 Microstructure of hardened layer

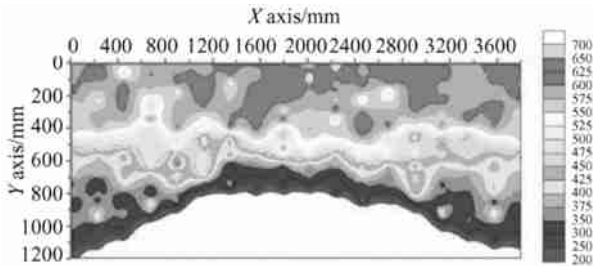


图 10 搭接区显微硬度二维分布图

Fig. 10 Two-dimensional microhardness contour line of overlapping zone
硬度进行测定。利用实验方法中所述的测定显微硬度的方法,绘制显微硬度的二维统计分布图,图 10 是显微硬度二维分布图。

根据硬度与显微结构的关系,图 10 中上部深色的区域是高硬度区,对应着马氏体区。下部深色区域的低硬度区是基体区。上部深色区域的显微硬度高于浅色部分,显然,二者分属于不同的马氏体形态。高硬度对应着针状马氏体形态,浅色区域属于板条状和片状马氏体区。从硬度分布图中可以看到,马氏体组织是呈区域性交错分布,使材料表面形成非均匀、多尺度强化结构,该分布理论上具有良好的硬度和韧性组合,具有良好的耐磨性和耐疲劳性。

3 结论

1) 选用合理的搭接率等工艺参数,球墨铸铁材料 QT700-2 激光搭接强化后的硬度可达到 50HRC 以上,满足了工艺的要求;

2) 调节搭接宽度可以避免搭接区的软化问题,是实现搭接区硬度不下降的关键;在其它工艺条件不变的情况下,搭接宽度增大,搭接区硬度和粗糙度增大;在其它工艺条件不变的情况下,第一条搭接带和第二条搭接带速度比增大,搭接区硬度和粗糙度减小;

3) 多次搭接强化球墨铸铁材料 QT700-2,强化后其表层的马氏体组织呈区域性交错分布,使材料表面形成非均匀、多尺度强化结构,因而使强化后的表面具有良好的耐磨性和耐疲劳性。

参 考 文 献

- [1] Miokovic T, Schulze V, et al. Influence of cyclic temperature changes on the microstructure of AISI 4140 after laser surface hardening[J]. Acta Materialia, 2007, 55: 589 - 599.
- [2] Pantelis I D, Bouyiouri E, Kouloumbi N. Wear and corrosion resistance of laser surface hardened structural steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 298: 125 - 134.
- [3] 庄其仁,张文珍,吕凤萍. 模具表面的激光热处理研究[J]. 中国激光, 2002, 29(3): 271 - 276.
ZHUANG Qi-ren, ZHANG Wen-zhen, LU Feng-ping. Study of the laser heat treatment for mould surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(3): 271 - 276.
- [4] 温宗胤,冯树强,等. 大型汽车覆盖件拉伸模具的激光表面强化处理[J]. 应用激光, 2006, 26(4): 230 - 232.
WEN Zong-yin, FENG Shu-qiang, et al. Big automobile over-laying pieces' deep-drawing mold strengthened by laser surface treatment[J]. Applied Laser, 2006, 26(4): 230 - 232.
- [5] 虞 钢,虞和济. 集成化激光智能加工工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 109 - 112.
- [6] 崔春阳,虞 钢,郑彩云,等. 球墨铸铁变换激光束淬火性能的研究[J]. 金属热处理, 2006, 31(10): 31 - 33.
CUI Chun-yang, YU Gang, ZHENG Cai-yun, et al. Properties of ductile iron modified by laser surface hardening with optical changing of laser beam[J]. Heat Treatment of Metals, 2006, 31(10): 31 - 33.