

文章编号: 0258-7025(2002)10-0945-05

# 快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器激光相变硬化 处理 HT250 的研究

叶云霞<sup>1</sup>, 符永宏<sup>1</sup>, 杨国成<sup>2</sup>, 陈朝晖<sup>3</sup>, 张永康<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 江苏理工大学机械工程学院, 江苏镇江 212013;  
<sup>2</sup> 南京跃进汽车集团南汽发动机厂, 江苏南京 210009; <sup>3</sup> 常州柴油机股份有限公司, 江苏常州 210032

**提要** 用快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器对 HT250 进行激光相变硬化处理, 优化出处理 HT250 所需的合理工艺参数匹配, 并从硬化带尺寸、微观组织形态、硬化带内硬度分布等方面分析了快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器进行激光相变硬化处理过程中, 工艺参数对硬化区的影响; 实际试验证明只要工艺参数选取适当, 轴流激光器也可用于热处理; 实验中发现当用某些参数处理材料时, 由于表面张力的作用, 试样的表面精度有所提高。根据试验结果拟合出所有工艺参数中两个最重要参数: 激光功率密度  $q$ , 激光扫描速度  $V$  的关系曲线, 给出了相应的公式。

**关键词** 激光相变硬化, 铸铁, CO<sub>2</sub> 激光器

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

## Study on Laser Phase Transformation Hardening of HT250 by High Speed Axis Flow CO<sub>2</sub> Laser

YE Yun-xia<sup>1</sup>, FU Yong-hong<sup>1</sup>, YANG Guo-cheng<sup>2</sup>, CHEN Zhao-hui<sup>3</sup>, ZHANG Yong-kang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jiangsu University of Science and Technology, Mechanical Engineering College, Zhenjiang, Jiangsu 212013  
<sup>2</sup> Nanjing Yue Jin Automobile Group, Nanjing, Jiangsu 210009  
<sup>3</sup> Changzhou Diesel Engine Joint-stock Limited Corporation, Changzhou, Jiangsu 210032

**Abstract** In this article, laser phase transformation hardening of HT250 material by high speed axis flow CO<sub>2</sub> laser is investigated. Appropriate laser hardening parameters, such as laser power  $P$  (W), laser scanning rate  $V$  (m/min), have been optimized through a number of experiments. The effects of the parameters on the hardened zone, including case depth, micro hardness distributions etc. are analyzed. The experiment shows that the axis flow CO<sub>2</sub> laser, which commonly outputs low-mode laser beam, also can heat treat materials as long as the treating parameters used are rational. During the experiments, the surface qualities of the specimens treated with optimized parameters were enhanced, which coincided with former results. According to the experimental results, the relation between the optimized parameters, the laser power densities  $q$  and the scanning rates  $V$  is given.

**Key words** laser phase transformation hardening, cast iron, CO<sub>2</sub> laser

## 1 引言

灰铸铁材料因其价格便宜、工艺性好、消震性强并有一定的耐磨性, 广泛应用于机械制造行业如机床导轨、汽车发动机缸体及缸套、机构凸轮等。但铸铁材料组织较疏松, 硬度低, 未经强化处理的铸铁材

料硬度值仅为 180 ~ 250HV, 因而在高温高压或有化学腐蚀的恶劣的工作环境里易磨损, 必须进行强化处理。常规热处理工艺, 如火焰淬火、中高频感应淬火等, 由于加热过程中工件受热引起的热应力, 易造成淬火开裂缺陷, 故不适用于铸铁材料<sup>[1]</sup>。激光相变硬化由于其独特的热处理机制, 即: 加热速度快、

收稿日期: 2001-06-18; 收到修改稿日期: 2002-03-04

作者简介: 叶云霞(1978.7—), 女, 江苏理工大学硕士研究生, 主要研究方向是特种加工。E-mail: yeyunxia@ujs.edu.cn

能量集中、加热范围小、变形小等特点,对铸铁材料非常适用。自 70 年代以来国内外许多学者对激光相变硬化处理铸铁材料都进行了广泛深入的研究,在激光工艺参数、强化机理及温度场的模型建立等方面取得了很多成就<sup>[1-6]</sup>。

以往研究人员大多采用横流 CO<sub>2</sub> 激光器对材料进行热处理,主要因为横流激光器一般输出高阶模,其光束横截面上能量分布较均匀,如图 1(a)所示。由此能量分布形式而产生的材料内部的温度分布也于横截面上分布均匀,处理出的硬化带横截面为平顶月牙形,这种轮廓的硬化带内各项力学性能指标分布亦较均匀,对于工件使用较为有利。而由于低阶高斯模或准高斯模,其能量分布不均匀,光斑边缘处能量逐渐趋于零,见图 1(b)。与此能量模式相对应的硬化带横截面为月牙形,硬化深度等都不及高阶模均匀,因而研究者一般认为输出低阶模光束的轴流 CO<sub>2</sub> 激光器等不适用于材料热处理。轴流 CO<sub>2</sub> 激光器的能量分布特点决定其常用于切割与焊接,因此除 R. C. Reed<sup>[2]</sup>等少数研究人员对用低阶模激光热处理材料进行了研究外,相关报道也很少。

采用了快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器对 HT250 进行热处理,其光斑模式为 TM<sub>01</sub> 准高斯模,从我们的试验结果可以发现只要工艺参数选取得当,硬化带的尺寸、内部硬度分布、组织形态等均能达到使用要求。

## 2 试验方法

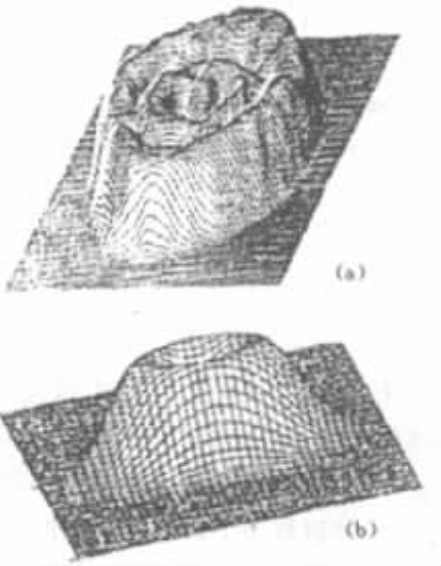


图 1 不同模式的激光光斑能量分布形式  
(a) 高阶模光束 (b) TM<sub>01</sub> 准高斯模

Fig. 1 Energy distribution of different-mode laser beam  
(a) high-mode laser beam ;(b) TM<sub>01</sub> mode

### 2.1 试验设备及试样

试验所用材料为 HT250,其化学成分为 C 3.09% ,Si 1.89% ,Mn 1.02% ,P 0.104% ,S 0.140% ,试样尺寸为 150 mm × 30 mm × 8 mm,热处理前对试样进行表面黑化处理,以提高表面对激光的吸收率。设备采用了 2.5 kW 的快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器,光斑模式为准高斯模式 TM<sub>01</sub>。将试样置于 LCM-12X20 数控机床的工作平台上进行热处理。

### 2.2 工艺参数的选取

激光相变硬化处理金属材料过程中<sup>[1,7]</sup>

$$T \propto \frac{\epsilon P}{DV}$$

这里,  $T$  为温度,  $\epsilon$  为材料表面涂层的激光能量吸收率,  $P$  为激光功率,  $D$  为光斑直径,  $V$  为激光束扫描速度。因而试验中通过不断改变激光功率  $P$ , 扫描速度  $V$ , 光斑直径  $D$  及吸收涂层, 逐步优化工艺参数。试验过程中将理论分析、宏观观察硬化后试样表面形貌及微观上观测硬化区有关性能等结合在一起, 在此基础上, 找出了激光相变硬化处理 HT250 的较优参数, 见表 1。

表 1 较理想的激光处理参数

Table 1 Better parameters during laser phase transformation hardening

Laser power density $q$ (W/mm <sup>2</sup> )	Scanning rates of laser beam $V$ (m/min)	Better scanning rates (m/min)
70.77	0.15 ~ 0.2	0.175
99.08	0.3 ~ 0.4	0.35
113.23	0.9 ~ 1.2	0.95
127.39	1.0	1.0
169.85	1.3 ~ 1.5	1.4
174.10	2.8 ~ 3.0	2.9
212.31	4.8 ~ 5.1	4.95
283.08	9 ~ 10	9.75

### 2.3 组织分析与性能测试

用 HV-1000 显微硬度计对不同参数处理过的硬化带的表面及沿深度方向硬度进行测试, 用 MM6 金相显微镜观察部分试样硬化带内金相组织, 最后挑选出效果较好的试样。在 MM200 磨损试验机上进行干摩擦磨损测试, 通过测量磨痕宽度来衡量磨损量大小。用电动轮廓仪测量了部分试样表面的粗糙度变化, 以此来判断用快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器进行激光相变硬化处理对试样表面精度的影响。

### 3 试验结果的分析讨论

#### 3.1 硬度测试结果及分析

通过试验得到的硬度分布曲线及所观测到的硬化区内的金相组织都基本与前人用横流激光器处理材料时的研究结果类似,即硬化带内沿深度方向硬度分布曲线为马鞍形,如图 2 所示。AC 段为固态相变区(马氏体 + 残余奥氏体 + 石墨),CE 段为过渡区(马氏体 + 奥氏体 + 石墨 + 微熔 Fe<sub>3</sub>C),E 点以后为基体。上述的金相组织及硬度分布的成因,很多学者已经作了大量成熟的研究,这里不再赘述。我们只对 A、C 两反常硬度低谷点作分析。A 点位于接近表面处,按常理该处吸收的激光能量最多,奥氏体化最完全,在表面无损的情况下硬度应最高,但从曲线上可以看出,接近表面处的硬度值反而低于次表层,分析原因认为可能是表面温度过高,发生脱碳现象,致使该处含碳量降低,硬度值下降;C 点处于过渡区与

相硬化区交界处,该处在整个硬化区沿深度方向的温度分布情况为:温度值低于表层,温度梯度低于 D 点(因为 D 点更接近基体),温度低,碳原子不能充分扩散,使得残余奥氏体较多,温度梯度小,使得所形成的马氏体晶粒粗大,大量的残余奥氏体和粗大晶粒的马氏体导致 C 处出现一硬度低谷。

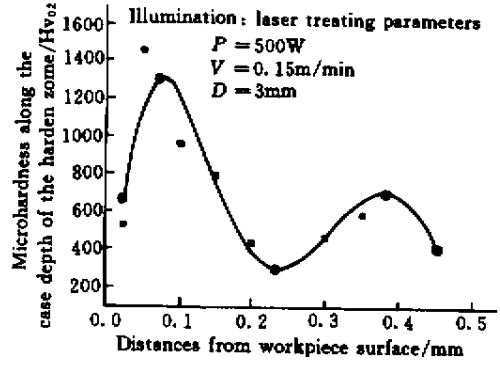


图 2 沿深度方向硬度分布曲线

Fig.2 Microhardness distribution along the case depth

表 2 不同激光参数下硬化带沿深度方向的硬度分布(光斑直径 D = 3 mm)

Table 2 Microhardness along the case depth achieved for different treating parameters( diameter of laser beam D = 3 mm)

The treating parameters		Micro hardness along the case depth( Hv0.2 )									
Laser power P /W	Scanning rates of laser beam V /m/min	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05	0.025
500	0.15	412	766	593	465		441	795	956	1449	528
500	0.2	733	1495	707	861	1322	1145	1449	927	644	644
700	0.3		187	593	1145	825		841			644
700	0.4				528	546	701	766		927	1027
1000	1.2		254	194	341	1027	1084	975	1006	666	540
1000	1.5				221	232	644	1006	766	1006	733
1230	2.7		278	168	460	546	739	401	460	593	739
1230	3.0				245	1120	264	655	1268	1268	286

另外从表 2 及图 3 可以看出,当所选激光输出功率较小,激光扫描速度较小时,得到的硬化层的深度较深,甚至在实验中发现当激光功率为 1.5 kW 以上时,其硬化层几乎已无法测到。这主要由铁碳合金淬火硬化的机理决定,激光加热工件表面,使其表面温度上升到奥氏体化温度 Ac<sub>1</sub> 以上,当激光束移走以后,通过工件自身进行快速冷却,得到马氏体从而改善组织性能。在这个过程中,加热阶段碳原子较充分地扩散到奥氏体中,才能成功硬化。根据公式<sup>[3]</sup>

$$S^2 = 2D_0 \int_{t_1}^{t_2} e^{-\frac{Q}{RT}} dt$$

式中, S 为碳原子的扩散距离, D<sub>0</sub>, Q 为常量 ( t<sub>2</sub> -

t<sub>1</sub>) 为激光热处理热循环过程中,温度保持在 Ac<sub>1</sub> 以上的时间段。当 ( t<sub>2</sub> - t<sub>1</sub>) → 0 时,扩散距离 S → 0,这就是说激光相变硬化过程中,作用时间过短,碳原子就不能充分扩散,因而当激光功率高,扫描速度过快时,硬化效果非常不明显。

#### 3.2 工艺参数的最终优化结果及分析

通过大量试验找出了不同大小激光功率所对应的不同扫描速度,当激光功率为 1.5 kW、2 kW 时(只是从表面状态上进行衡量),在这种匹配下,激光相变硬化效果较好(即表面未受损,硬化区深度较大,硬化区内硬度分布较均匀)其结果如表 1。

根据表 1 拟合出如图 4 所示的曲线,曲线的近

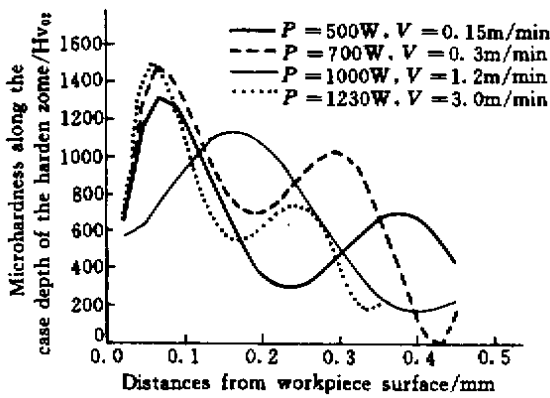


图3 不同激光功率参数所对应的硬度分布曲线  
Fig.3 Microhardness distribution along the case depth achieved for different parameters

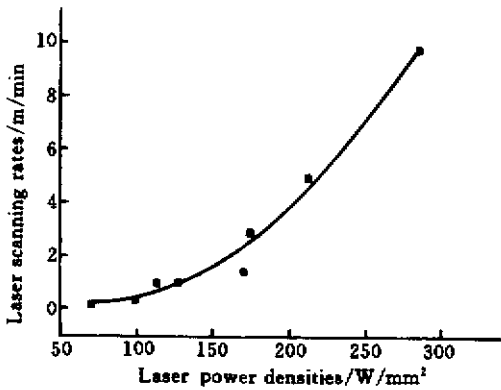


图4 激光功率密度与扫描速度的关系  
Fig.4 Relationship between the laser energy density and scanning rate

似拟合公式为

$$P = 223.92 - 0.842V + 0.0009V^2$$

在以后的一系列用快速 CO<sub>2</sub> 激光器对材料进行激光相变硬化过程中,证明图 4 曲线及上述公式对工艺参数初选很有参考价值。

### 3.3 磨损性能及变形量的测试

试验中我们在 MM200 磨损试验机上对处理过的 HT250 未处理过的 HT250 及加硼合金铸铁进行干摩擦磨损试验,试验结果证明用优化过的工艺参数处理过的 HT250,其耐磨性比未处理过的 HT250 提高 3~4 倍,比硼铸铁提高 4~5 倍(硼铸铁的耐磨性理论上应比 HT250 好,但我们经过反复试验发现在干摩擦情况下,未处理过的 HT250 耐磨性比硼铸铁好,此反常现象我们将作进一步研究)。在电动轮廓仪上所测的试样处理前后的表面粗糙度的变化也较小,最好的结果是当  $P = 500 \text{ W}$ ,  $V = 0.2 \text{ m/}$

min 时,  $R_a$  值基本不变。

## 4 问题分析

试验中发现对于那些处理前表面粗糙度特别低的试样,当用某些参数进行处理后,表面变得平滑光亮,粗糙度明显下降,这在文献 [4] 中曾经提到过此现象,但以后鲜有人提及。据此作者分析是由于表面发生了微熔后,在液体表面存在张力的作用<sup>[8]</sup>

$$\Delta P = \theta \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

式中  $\Delta P$  为体积膨胀时所要做的功,  $\theta$  为表面张力,  $R_1, R_2$  为描述曲面的两个曲率半径。

由于在整个热处理过程中  $\Delta P$  的存在决定了表面张力的存在,此张力使得液体形成均匀光滑的表面,从而降低了表面张力。如果能充分研究利用此现象,则可以省去目前工业应用中,激光相变硬化后用于矫正工件表面变形的后续工序,对于实际应用来说具有相当大的价值。

## 5 结 论

1) 通过一系列的试验找出了快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器对 HT250 进行激光相变硬化处理时的较优参数,为快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器能进行材料热处理提供了试验依据。

2) 分析了快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器相变硬化处理过程中硬化区的几何尺寸、硬度分布及组织形态等随处理参数变化的规律及其原因。

3) 通过试验拟合出  $q-V$  曲线,为快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器对材料进行激光相变硬化处理时工艺参数初选提供了简便可行的依据。

4) 对试验中发现的表面精度提高,尤其是表面粗糙度降低的现象分析了原因,指出如果对此现象作进一步深入的研究,则可以省去一些后续工序,从而节省了生产成本,提高了生产效率,这将会带来巨大的经济效益。

## 参 考 文 献

- 1 Zhao Xin, Jin Jie, Ding Xing *et al.*. Effect of wide-band laser heat treatment on the microstructure and strength toughness of cast iron [J]. *Journal of Tianjin University* (天津大学学报), 1999, 32(6): 754 ~ 757 (in Chinese)
- 2 R. C. Reed, Z. Shen, J. M. Robinson *et al.*. Laser transformation hardening of steel: effects of beam mode, beam size and composition [J]. *Materials Science and Technology*,

1999, 15(8):109~118

3 R. K. Shiue, C. Chen. Laser transformation hardening of tempered 4340 steel [ J ]. *Metallurgical Transactions A*, 1992, 23A(1):163~170

4 Xie Shuming, Ye Jianxiang. Effects of laser parameters on laser melting of grey cast iron surface [ J ]. *Metallurgical Heat Treatment Actions* ( 金属热处理学报 ), 1987, 18(1):79~88 ( in Chinese )

5 Li Junchang, Chen Qinghua, J. Merlin. Semi-analytical calculation of the laser beam induced transient temperature field in the solids [ J ]. *Chinese J. Lasers* ( 中国激光 ), 1998, A25(8):753~758 ( in Chinese )

6 M. Labudovic, D. Hu, R. Kovacevic. Three-dimensional finite element modelling of laser surface modification [ J ]. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 2000, 214B(7):683~692

7 Yan Yuhe, Zhang Minling. High Power Laser Machining and Application [ M ]. Tianjin: Tianjin Press of Science and Technology, 1994 ( in Chinese )

8 Cheng Chuanxuan. Physics and Chemistry on Surface [ M ]. Beijing: Press of science and literature, 1995 ( in Chinese )



## 敬 告 作 者

最近,编辑部收到了中国科协学会技术部“关于在学术论文中规范关键词选择的决定(试行)”的通知。现全文刊登如下:

一、发表在中国科协系统学术期刊中所有学术论文,必须在摘要后列出不少于4个关键词。从技术角度考虑,没有关键词的论文应列入非学术论文类。

二、这些关键词按以下顺序选择:

第一个关键词列出该文主要工作或内容所属二级学科名称。学科体系采用国家技术监督局发布的《学科分类与代码》(国标 GB/T 13745-92)。

第二个关键词列出该文研究得到的成果名称或文内若干个成果的总类别名称。

第三个关键词列出该文在得到上述成果或结论时采用的科学研究方法的具体名称。对于综述和评述性学术论文等,此位置分别写“综述”或“评论”等。对科学研究方法的研究论文,此处不写被研究的方法名称,而写所应用的方法名称。前者出现于第二个关键词的位置。

第四个关键词列出在前三个关键词中没有出现的,但被该文作为主要研究对象的事或物质的名称,或者在题目中出现的作者认为重要的名词。

如有需要,第五、第六个关键词等列出作者认为有利于检索和文献利用的其他关键词。

三、各期刊编辑部对促进科学技术的发展和学术论文的质量负有重大责任和义务。关键词是学术论文进入流通和引用的窗口,规范关键词选择有利于检索和引用。希望各编辑部提高对此项工作的认识,深入开展编辑业务研究,精益求精,与时俱进,不断提高刊物质量。

四、各全国性学会和地方科协学会部在组织学术会议、学术论文时,请提醒作者参照此项规定执行。

希望广大作者在投稿时,参照通知精神规范选择关键词。

谢谢合作!

《中国激光》编辑部  
2002年9月16日