

# 40Cr 表面横流激光束相变硬化

李刚, 李鑫, 邱玲

辽宁工程技术大学材料科学与工程系, 辽宁阜新(123000)

E-mail: [lixin041@163.com](mailto:lixin041@163.com)

**摘要:** 本实验选用 40Cr 为基体材料, 利用 HL-1500 无氮横流 CO<sub>2</sub> 激光加工机对其进行表面激光相变硬化处理, 分析研究在不同工艺参数条件下所得到材料表面组织及性能。结果表明: 激光处理后的硬化层由相变硬化区和热影响区组成, 相变硬化区组织为细小的马氏体和残余奥氏体, 导致耐磨性升高, 最高可提高 7.92 倍。耐腐蚀性明显提高, 显微硬度提高, 表面最高硬度达到 920.3HK, 是基体的 3.78 倍。

**关键词:** 40Cr 钢; 横流激光束; 相变硬化; 显微硬度

## 1. 引言

近年来, 大量的研究结果表明<sup>[1-5]</sup>, 各类碳钢以及铸铁经激光相变后, 均能取得显著的强化效果。激光表面处理技术在工业应用方面取得了长足的进步, 成为表面工程一个十分活跃的新领域。激光表面处理既可以通过激光相变硬化(激光淬火)、表面熔凝改变基体表层材料的微观结构, 也可以通过激光熔覆气相沉淀和合金化等处理方法同时改变基体表面的化学成分和微观结构。其中, 激光相变硬化体现了各种激光表面处理技术中研究和应用最多的方法之一。在本设计中, 将利用激光在 40Cr 表面进行扫描处理, 观察和分析激光对 40Cr 合金钢基体造成的组织和相的变化。并通过硬度、耐磨性和耐腐蚀性实验对 40Cr 合金钢表面激光相变硬化效果进行分析和论证。激光对金属材料表面处理, 是近十几年来发展起来的一项新技术, 无论是对黑色金属还是有色金属, 在实践的应用中都显示了独特的优越性, 并在工业生产上得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。

相变硬化的研究已经进行了很长时间, 目前主要应用在汽车、拖拉机、内燃机车中各种缸套、缸盖及凸轮轴、齿轮、阀座、摇臂等易磨损零件<sup>[4]</sup>。

本实验选用材料为 40Cr, 研究经激光加工机横流扫描之后的试样硬化层的性能, 研究其耐磨性, 耐腐蚀性及硬度, 并与基体进行比较, 探讨经横流相变硬化之后组织性能变化情况, 并用来指导日后的实际生产实践。

## 2. 实验材料及实验方法

### 2.1 实验材料

本实验所用材料为 40Cr, 其原始成分见表 1

表1 40Cr合金原始成分(质量分数/w%)

Table.1 The original composition (mass fraction/w%) of 40Cr

C	Si	Mn	P	Ni	S	Cr
0.37~0.45	0.2~0.4	0.5~0.8	≤0.035	>0.35	≤0.035	0.8~1.1

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 横流激光相变硬化处理

本实验采用 HL-1500 无氮横流 CO<sub>2</sub> 激光加工机对经过刷涂增吸收涂料的 40Cr 试样进

行激光相变硬化处理，工艺参数如下：

表2 试样说明（工艺参数）  
Table. 2 Test specimen explanation

试样号 No.	功率	扫描速度	离焦量	光斑直径 mm
	W	mm/s	mm	
M	850	6	270	4
N	750	6	270	4
O	650	6	270	4
P	950	6	270	4
Q	1050	6	270	4
R	550	6	270	4

### 2.2.2 显微组织观察及力学性能测试

- 1) 将试样磨平抛光，用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀，制成金相试样，用 SSX-550 型扫描电子显微镜观察试样的显微组织。
- 2) 用 DMH-2LS 努氏显微硬度计，在 25 克载荷下，加载时间 15s，测量激光熔凝硬化层不同深度处的显微硬度，测量时，在横截面的不同位置测量沿硬化层深度方向的硬度值，第一个点在距硬化层表面 0.05mm 处，以后每隔 0.1mm 打点，在平行处打三个点，再对相同深度的硬度值求平均值，即为此深度上的显微硬度值。
- 3) 采用 ZF-3 恒电位仪，参比电极为饱和甘汞电极，辅助电极为 Pt 电极，在浓度为 0.5mol/L 的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中测试其阳极极化曲线。实验中先测定试样在稀硫酸中的自腐蚀电位，然后调节恒电位仪进行阳极极化，每隔 30 秒调一次电位，每次调 30mv。
- 4) 在 ML-10 磨粒磨损试验机做磨损处理试验，粒度是 240 目的砂纸，磨损机转速是 38r/min，采用 3kg 加载方式，使样端面在试验中与砂纸接触良好，拉杆往返四次（单次直线距离为 40mm）。在精度为 0.0001g 的电子天平上进行磨前磨后称重；

## 3. 试验结果及分析

### 3.1 硬化层显微组织结构

图 3-1 为激光硬化层的全貌组织扫描电镜照片。图中从左至右依次为相变硬化区、热影响区、基体。图 3-1 (A) 为试样 N, 其硬化层深度为 638μm, 图 3-1(B) 为试样 Q, 其硬化层深度为 773μm。可见不同功率的激光束会影响硬化层的深度。

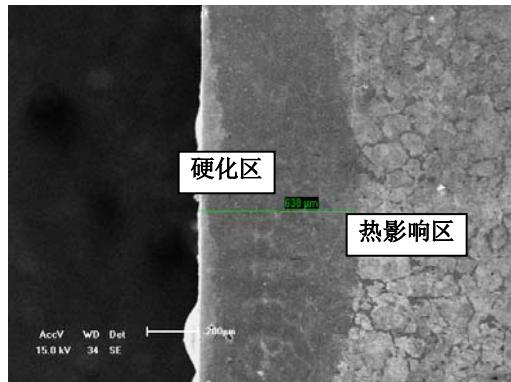


图 3-1 (A) 试样 N 硬化层宏观组织形貌  
Fig3-1(A) Test specimen N hardened level macroscopic organization appearance

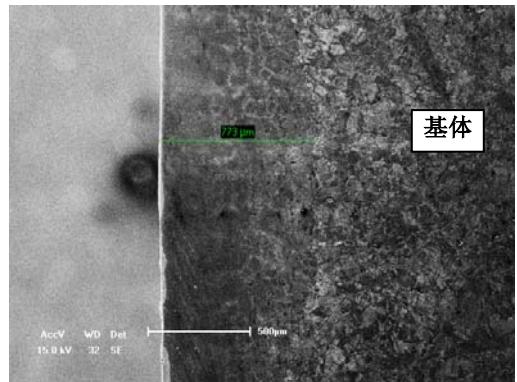


图 3-1(B) 试样 Q 的硬化层宏观组织形貌  
Fig3-1 (B) Test specimen Q hardened evel macroscopic organization appearance

图3-2为相变硬化区。激光表面强化是利用激光对材料辐射，使材料的表面部分以很高的速度被加热，随后靠材料自身的快速导热又以很快的速度冷却，这种快速加热和快速冷却的特点使加热区的组织结构发生变化，从而呈现很多特殊的性能。相变硬化区由于高功率激光辐照，材料表面温度高，升温快，由于急速冷却，作用时间较短，奥氏体转变不完全，导致在随后的冷却过程中残留部分奥氏体。相变硬化区组织主要为细针状马氏体和残余奥氏体。出现细针状马氏体是由于加热速度和冷却速度极快，奥氏体来不及长大，所获得的马氏体组织也因此细小。细针状马氏体是提高基体表面的显微硬度的主要原因。研究结果表明，材料表面强化不仅仅与马氏体的形成有关，而且还依赖于马氏体内部成分及其尺寸大小。马氏体晶粒越细，硬度越高；如果在马氏体内部形成孪晶，对基体的强化作用更明显，但对表面韧性有一定的影响；这可以通过调整和改变激光能量密度、扫描速度等参数来加以改善。

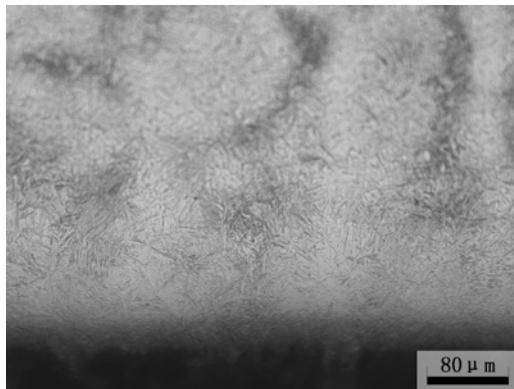


图 3-2 (A) 试样 P 相变硬化区显微组织  
Fig3-2(A) Test specimen P changes the hard zone Microstructure macroscopic organization appearance

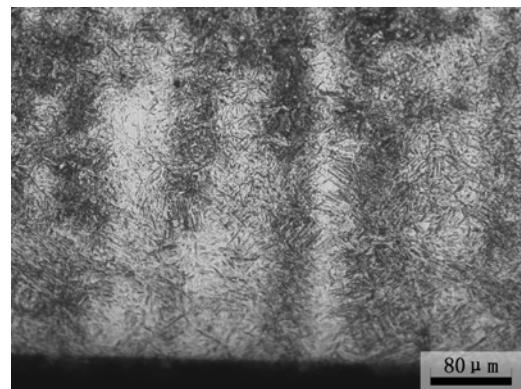


图 3-2 (B) 试样 M 相变硬化区显微组织  
Fig3-3 Test specimen M changes the hard zone Microstructure macroscopic organization appearance

图 3-3 为热影响区。热影响区组织结构由马氏体、残余奥氏体、铁素体组成。由于温度梯度的降低，铁素体转变为奥氏体的过程同样进行的不完全，所以冷却后会残留铁素体。

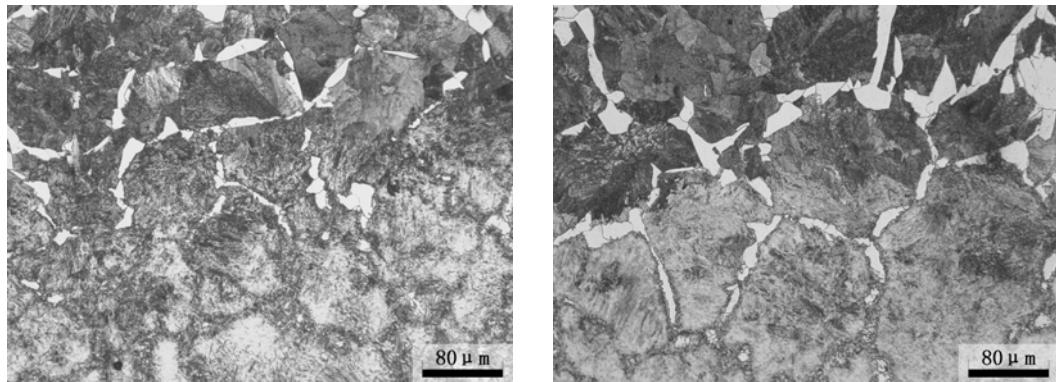


图 3-3 (A) 试样 M 热影响区显微组织  
Fig3-3(A) Test specimen M heat-affected zone  
Microstructure macroscopic organization appearance

图 3-3 (B) 试样 P 热影响区显微组织  
Fig3-3(B) Test specimen P heat-affected zone  
Microstructure macroscopic organization appearance

图 3-3 上部为试样基体的显微组织。基体为经过正火处理的 40Cr，所得到的组织为珠光体和铁素体。这与激光相变硬化前的组织无明显差别。由此可看出，利用激光处理的材料得到所需表面的同时，基体组织仍保持原状态。这也是激光熔凝硬化技术的优势所在。

### 3.2 激光硬化层的显微硬度

图3-4为试样R、O、N、M、P、Q不同深度显微硬度图。表3-1为试样的功率与最高硬度对照表。从两图中，可以看出，经过激光相变硬化处理过的试样表面硬度有明显的提高，最高硬度可达920HK，而硬度从硬化层到基体硬度急剧下降，基体硬度几乎不发生改变。

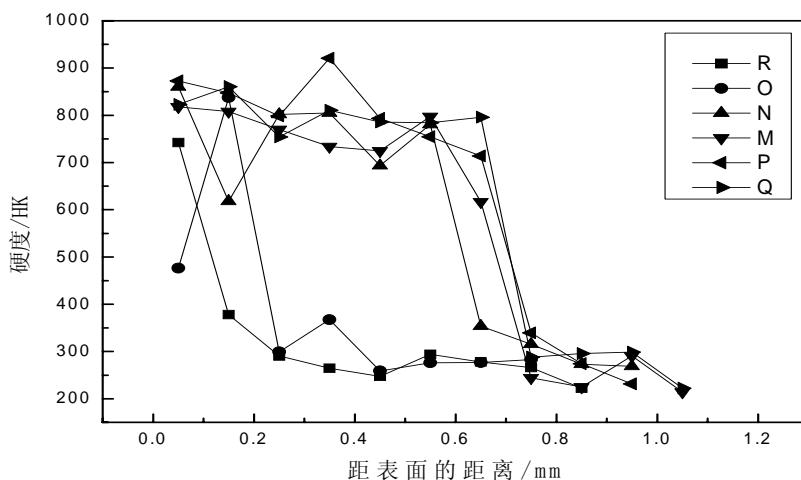


图3-4 试样横截面显微硬度  
Fig3-4 Test specimen lateral section microhardness

相变硬化区具有较高硬度是由于激光加热速度快，导致奥氏体颗粒超细化，碳来不及扩散，以至于表面的碳含量相对较高，而这导致转变的马氏体具有较高的碳含量。晶粒细化和马氏体的高碳含量和高位错密度是获得超高硬度的主要原因。

激光超快速加热条件下，过热度大，造成相变驱动力很大，奥氏体形核数目急剧增加。它既可在原晶界和亚晶界成核，也可在相界面和其它晶体缺陷处成核，而在快速加热下的瞬间奥氏体化使晶粒来不及长大，在马氏体转变时，必然转变成细小的马氏体组织；另一方面，

激光快速加热，使得扩散均匀化来不及进行，奥氏体内碳及合金元素浓度不均匀性增大，奥氏体中含碳量相似的微观区域变小，在随后的快速冷却条件下，不同的微观区域内马氏体形成温度有很大的差异，这也导致了细小马氏体组织的形成。钢激光淬火的马氏体相变与常规淬火马氏体相变主要不同在于它往往获得极细的片状和板条状马氏体的混合组织马氏体及其亚结构细化以及晶体缺陷和晶格畸变的大幅度增加。导致激光淬硬层的高硬度<sup>[7]</sup>。

试样 R、O 与试样 N、M、P、Q 的硬度曲线形态存在很大的差异，这是因为试样 R、O，由于激光功率较小，激光束停留在材料上的时间短，吸收的能量少，热量传递深度也浅，因此硬化层深度小。两图对比可以看出，激光功率较大的时候所形成的硬化层深度要大，因为激光功率较大，导致试样吸收了较多的能量，能量继续向下传递，从而得到了较深的硬化层。我们定义从表层至基体硬度区深度为硬化层深度。深度受扫描功率的影响特别明显，扫描功率越大，硬化层越深，所以，我们可以利用控制激光功率来获得我们所要求的表面硬化层的厚度。

在实验条件下，40Cr 表面最高硬度（试样 P）达 920HK，而基体硬度平均仅 243HK。40Cr 激光相变硬化后的最高硬度是基体硬度的 3.78 倍。此外，结果还表明，根据显微硬度分布曲线来确定淬硬层深(表面至母材原始硬度处)，其值与扫描电镜测量结果基本相符。

表 3-1 功率与最高硬度对照表  
Table 3-1 Power and highest degree of hardness comparative table

试样号	基体	R	O	N	M	P	Q
功率/w	0	550	650	750	850	950	1050
最高硬度/HK	243	742.4	837.4	859.8	817.5	920.3	860.7

### 3.3 耐磨性试验

耐磨性是材料在一定的摩擦条件下表现出来的抗磨损能力，它不是固有的属性，而是一个系统的特性，故讨论耐磨性时必然涉及到磨损机制。常见的磨损形式可分为四类，即：黏着磨损、磨料磨损、疲劳磨损和腐蚀磨损。

在实际的工况条件下，因磨损情况复杂，常常是几种磨损同时出现。无论什么类型的磨损造成材料表面破坏均可以用外形尺寸、体积或重量的变化来表示。本次实验采用磨料磨损来观察激光熔凝处理后试样的相对耐磨性。磨损率越大，说明工件的耐磨性越差。相对耐磨性是磨损率的倒数，相对耐磨性越大，说明工件的耐磨性越强。

磨损前对各个试样的接触面进行处理，由于试样磨损接触面积是不同的，所以需要计算磨损率，质量变化如下表所示：

表 3-2 试样磨损前后的质量  
Table 3-2 Around the test specimen wears the quality he sample quality

试样	磨损前 m1/g	磨损后 m2/g	面积 mm <sup>2</sup>	失重△m/g	磨损率△m/s (g/ mm <sup>2</sup> )	相对耐磨性
M	19.844	19.8201	2.175	0.0239	0.01098851	7.923733
N	14.727	14.6906	1.6	0.0364	0.02275	3.827253
O	21.693	21.6362	2.25	0.0568	0.02524444	3.449077
P	21.8029	21.7209	2.295	0.082	0.03572985	2.436898
Q	21.4919	21.4653	2.24	0.0266	0.011875	7.332212

R	22.2311	22.1969	2.4	0.0342	0.01425	6.110177
基体	5.308	5, 2046	0.11875	0.1034	0.08707	1

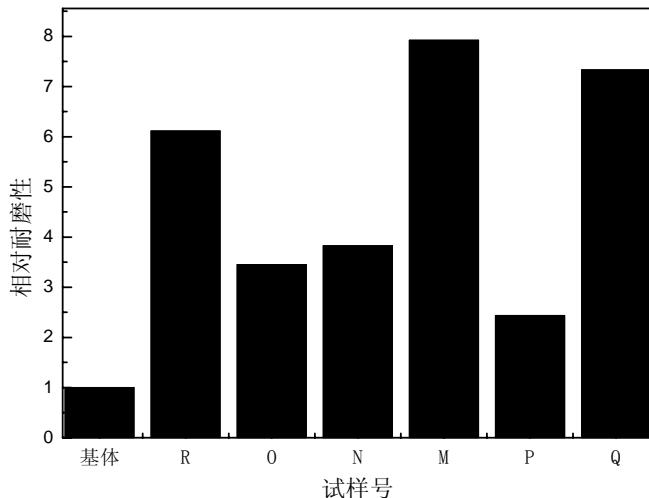


图 3-5 不同功率下的相对耐磨性  
Fig 3-5 Under different power relative resistance to wear

由图 3-5, 可知, 经过激光相变硬化处理过后的试样的表面硬度明显高于基体的平均硬度。随着激光功率的增加, 试样的硬度在一定范围内上下波动。其中, 激光功率为 550w (试样 R), 850w (试样 M), 1050w (试样 Q) 时硬度明显升高。可见, 激光相变硬化层的耐磨性能并不是与激光功率成正比。激光功率过高或过低都会影响试样的耐磨性能, 有一最佳功率, 功率过高, 表面熔化, 形成的晶粒粗大, 不利于提高试样的耐磨性。功率过低, 达不到奥氏体转变温度, 又起不到强化作用。

图 3-5 中可以看出, 经过激光相变硬化处理的试样表面的相对耐磨性比基体表面有明显提高。最高 (M 试样) 可提高 7.92 倍。

表 3-3 不同功率试样相对耐磨性和硬度的对照表  
Table3-3 Different power test specimen relative resistance to wear and degree of hardness comparative table

功率/w	基体	550	650	750	850	950	1050
相对耐磨性/ ( $\text{mm}^2/\text{g}$ )	11.48501	70.17544	39.61268	43.95604	91.00415	27.9878	84.21053
最高表面硬度/HK	243	742.4	837.4	859.8	817.5	920.3	860.7

### 3.4.1 腐蚀试验

我们使用极化实验来研究试样的耐腐蚀性能。

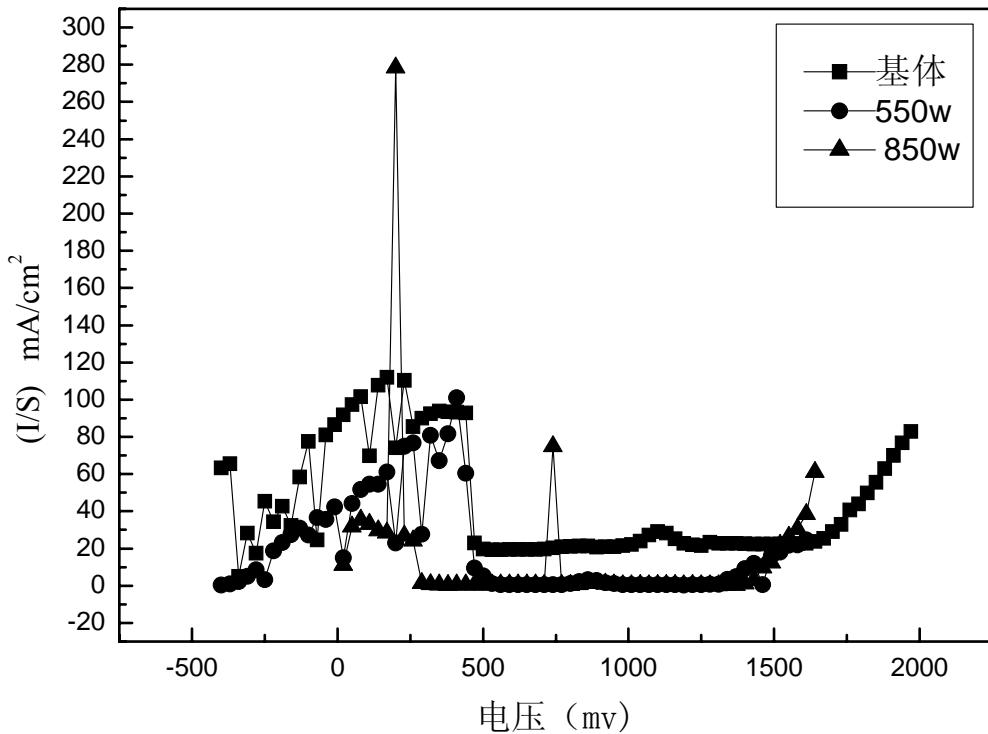


图 3-6 不同相变硬化层的阳极极化曲线  
Fig 3-6 The polarization curves of different hardened layer

从图中，我们可以看出：不同激光功率处理过的试样都出现了较为明显的钝化现象，且变化趋势基本一致。

表 3-4 不同功率的极化参数  
Tab.3-4 Different power polarized performance

激光功率 W	致钝电流密度 $\text{mA}/\text{cm}^2$	维钝电流密度 $\text{mA}/\text{cm}^2$	自腐蚀电位 mV
基体	110.4	23	400
550w	101.0671	0.6097656	400
850w	44.91228	0.467836	430

从图 3-6 和表 3-4 可以看出，对于经过激光相变硬化处理的试样，其致钝化电流密度小于相应基体的致钝化电流密度，这表明经激光相变硬化处理后的试样的活性溶解速度比基体试样的活性溶解速度有进一步降低；经激光相变硬化处理后的试样的致钝化电位较之相应基体试样的致钝化电位向负方向发生了移动，说明经激光相变硬化处理后的试样要比基体易钝化；激光相变硬化处理试样的维钝化电流密度远比基体试样的维钝化电流密度小，这表明经激光相变硬化处理后的试样稳定阶段的溶解速度比基体稳定阶段的溶解速度有进一步降低，激光相变硬化层的钝化性能进一步提高；经激光相变硬化处理后的试样的钝化电位比相应基体试样的钝化电位小，而试样经激光相变硬化处理后的过钝化电位相差无几，表明激光相变硬化处理试样的钝化区比基体的钝化区要宽，说明激光功率的变化使阳极极化曲线的致钝电

流密度和维钝电流密度都发生不同程度的减小，钝化区范围增大。说明激光相变硬化确实可以增强试样的钝化能力。尤其是激光功率为 850w 时，致钝电流密度和维钝电流密度最小，而钝化区间最大，说明此时的硬化层的耐蚀性能最好。

#### 4. 结论

- 1) 40Cr 钢经激相变硬化处理后，硬化层分为两部分，即相变硬化区和热影响区其组织分别为针状马氏体和残余奥氏体，马氏体+残余奥氏体+铁素体+碳化物。
- 2) 经激光相变硬化处理后试样表面硬度明显提高，激光功率越大，硬化层越深；表面最高硬度达到920.3HK，是基体的3.78倍。
- 3) 激光硬化层的耐磨性能并不是与激光功率成正比，而是在一定的范围内上下波动。经过激光相变硬化处理后试样的耐磨性普遍要比基体高，最高可提高7.92倍。
- 4) 经激光相变处理后的 40Cr 钢在浓度为 0.5mol/L 的硫酸溶液中有较好的耐蚀性。850w 时，硬化层耐腐蚀性能最好。

#### 参考文献

- [1] 李明生.激光表面改性的进展和前景[J].安徽工学院学报,1990,9(2): 99-102.
- [2] 黄开金,谢长生,等.激光熔凝和相变硬化的研究现状[J].激光杂志,2002,(23):11-15.
- [3] 李志忠.激光表面强化[M].北京:机械工业出版社,1992,97.
- [4] 李正佳,夏红星,陈玉婷,等.21 世纪激光光学技术[J].光学与光电技术,2005,(3):3-6.
- [5] 张永康主编.激光加工技术[M].北京:化学工业出版社工业装备与信息工程出版中心,2004,15.
- [6] 王尚志,孙景,田乃良.高钴硬质合金激光表面相变硬化淬火[J].中国有色金属报,1998,8(1):89.

## Study on Microstructure and Property of 40Cr by lasertrans Normati on hardening

Li Gang, Li Xin,qiuling  
Liaoning technical university, Nuxin, Liaoning (123000)

#### Abstract

This experiment selected 40 Cr as the based materials,Use of Laser processing machine HL\_1500 without he cross-flow Co2 to make a surface.

laser transformation hardening treatment. The analytical study to the material surface organization and the performance under the different technological parameter condition shows that laser treatment, the hardening layer from the melting zone, transformation hardening and the heat-affected zone, organizations to small uniform martensite, have a high density of dislocations, which are the main reasons of high micro hardness.

**Keywords:** 40Cr; laser melting; micro hardness