第23卷 增刊
2001年 9月

北 京 科 技 大 学 学 报
Journal of University of Science and Technology Beijing

Vol.23
Sept. 2001

# 金属材料激光强化的钠米压痕硬度和模量

张泰华　甘翠华　虞 钢　杨业敏　苏志霄　梁乃刚

中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室，北京 100080

**摘　要**　使用纳米压痕实验技术对激光强化铸铁材料的力学性能进行了研究. 同显微硬度技术相比，该技术能提供激光表面改性不同组织的实时载荷、硬度、模量等随压痕深度变化的规律.

**关键词**　激光强化；铸铁；纳米压痕实验技术；硬度和模量

**分类号**　TN 249; TG 115.5+1;

表层局部激光处理方法主要用于强化金属材料的表面，可以提高材料的表面硬度、耐磨性、耐蚀性以及强度和高温性能，而材料仍保持原有的韧性. 激光硬化可以大幅度提高产品质量，成倍地延长产品的使用寿命，具有显著的经济效益[1]. 纳米压痕技术是近十几年来发展起来的一种新的力学性能测试方法，它能连续控制载荷和位移，而且具有很高的分辨率. 这种技术可以从载荷—压痕深度数据中直接获得材料表面微米乃至纳米的力学性质，如弹性模量、硬度等，已广泛应用于材料表面工程等相关的科学领域[2].

本文采用自行研制的大型激光材料加工系统[3]，对冲压模具进行了强化处理，重点尝试使用新引进的先进纳米压痕实验系统，分别对处理前后试样的力学性能进行了初步研究.

## 1　试验材料和方法

试验中所用基材为珠光体+片状石墨的铸铁材料. 用三种不同激光工艺参数对其进行处理. 沿激光扫描的垂直方向切取横截面，制成9 mm×9 mm×14 mm的长方体试样. 采用先进的钠米压痕试验技术对铸铁不同组织的力学性能变化进行研究.

钠米压痕试验系统为美国 MTS 公司生产的 Nano Indenter XP System. 用该系统测量硬度和模量随压痕深度的变化. 铸铁的力学性能如硬度、模量等取决于它的组织. 激光处理后试样横截面的显微组织和压痕形貌是通过扫描电镜(SEM)和光学显微镜(OM)观察的.

## 2　结果与分析

为便于比较，在远离激光处理区的基体上进行压痕试验. 结果见图1. 需强调指出，这里的硬度定义为 $H=P(d)/A(d)$，其中 $P$ 为载荷，$A$ 为在此载荷作用下的压痕表面积的投影，$d$ 为压痕深度. 它反映了材料对接触载荷承受的能力. 维氏(Vicker)和别尔阔维契(Berkovich)显微硬度定义为 $H=P_{max}/A$，其中 $P_{max}$ 为最大载荷，$A$ 为在此载荷作用下的残余压痕表面积，它反映材料抵抗塑性形变的能力. 对塑性形变起主要作用的过程，两种定义给出类似的结果；但对弹性形变为主的接触过程，残余压痕表面积非常小，传统的定义将导致硬度很大. 表1中的 $H_A$ 和 $E_A$ 分

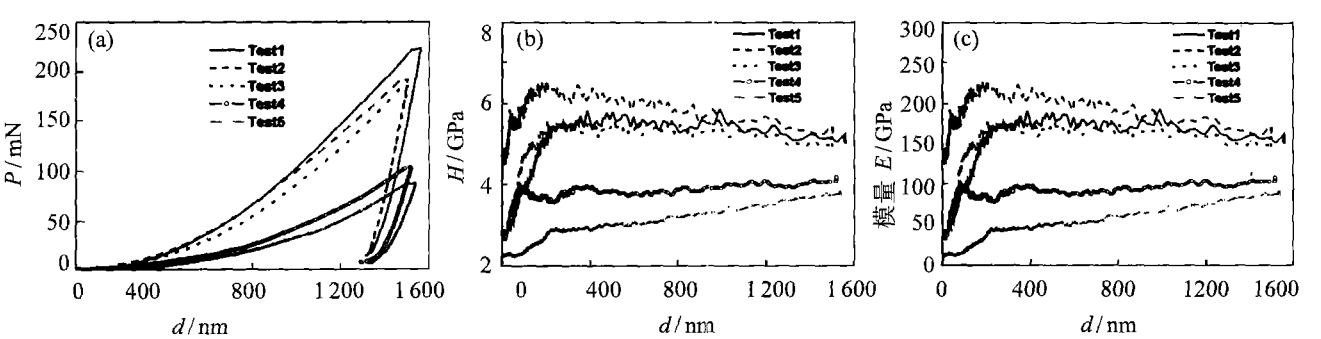


图1 基体测试结果

收稿日期 2001-06-04　张泰华　男，35岁，高级工程师

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 基体测试结果

| 位置 | Test1 | Test2 | Test3 | Test4 | Test5 |
|---|---|---|---|---|---|
| $H_A$/GPa | 4.860 | 4.720 | 3.916 | 1.824 | 1.402 |
| $E_A$/GPa | 172.204 | 188.915 | 164.218 | 93.539 | 62.998 |
| $H_U$/GPa | 4.386 | 3.981 | 3.852 | 2.020 | 1.651 |
| $E_U$/GPa | 159.888 | 165.120 | 154.819 | 100.951 | 86.092 |

别表示 400 nm×1 400 nm 之间的平均硬度和模量，$H_U$ 和 $E_U$ 表示最大卸载处的硬度和模量. 图2中从左到右依次为 Test1~Test5 的压痕位置. Test1~Test3 压痕落在珠光体上，而Test4和Test5压痕近邻或重叠在片状石墨上，故硬度和模量较低.

用三种不同的激光工艺参数来处理同一试样的不同部位. 激光处理后的横截面一般可分3个区，熔融或相变强化区、过渡区和基体. 图3和图4是 AV0102 激光相变处理区的显微组织和压痕位置照片. 在光学显微镜和SEM下观察，边界处有一白亮的圆弧带(图3和图4(d))，这主要是由组织明显细化所致，为马氏体；片状石墨变少和变小. 相变强化区(马氏体)和过渡区(指纹状珠光体)的边界和组织变化有明显的差异(图4(b)). 用纳米压痕试验系统沿激光处理方向进行压痕实验. 具体试验结果见图5，硬度和模量呈明显的梯度变化. 具体压痕位置见图4，在

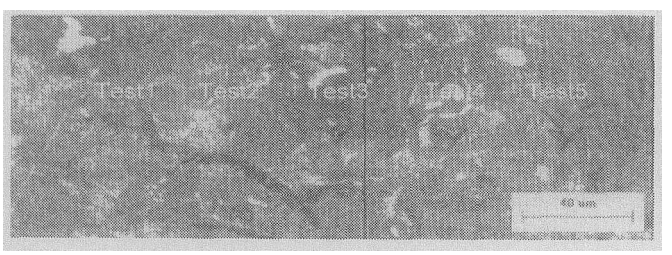


图2　基体压痕位置(OM)

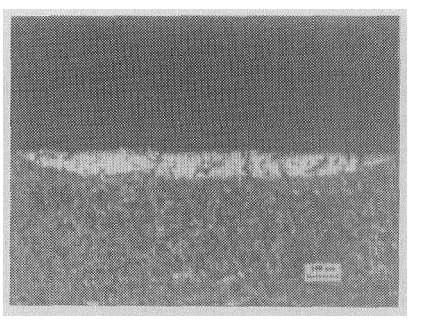

图3 AV0102 激光强化区(OM)

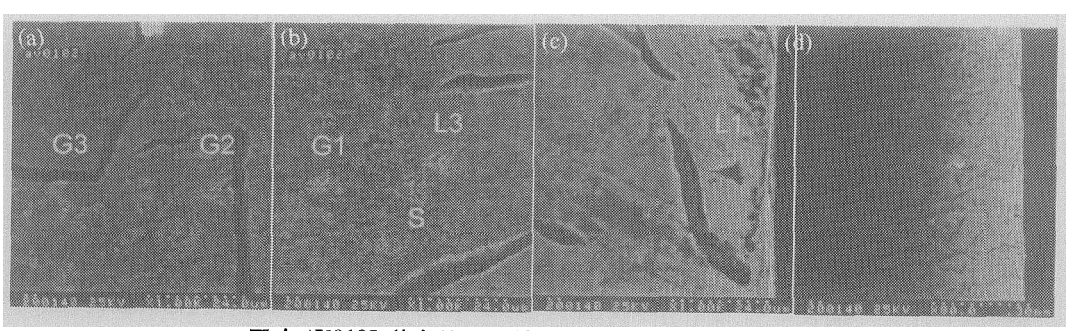


图4 AV0102 激光处理区的组织形貌和压痕位置

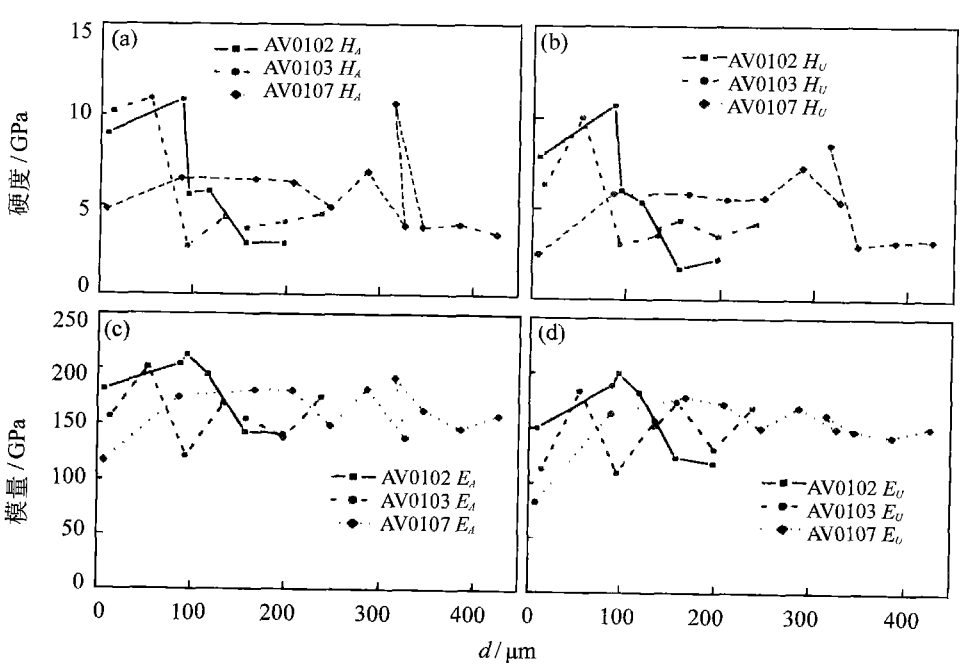


图5 三个激光处理区的硬度(a,b)和模量(c,d)分布

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

激光强化区，L1 表示离处理表面最近的第一个压痕，L2 表示第二个压痕，间距为 40 μm，以后以此类推. G 表示过渡区的压痕，S 表示在强化区和过渡区界面上的压痕. 由于L1 离表面较近(7 μm)，自由表面对测试结果有影响，故压痕为非正三棱锥，且硬度和模量值低于 L3 (L2 无测试结果). S 点离 L3 仅几个微米，L3 对 S 压痕相当于形成新的表面(指垂直照片)，故S点的硬度低于 G1. G2 紧邻片状石墨. 这样就能大致解释了图 5 中 AV0102 硬度和模量变化的趋势.

在图 5 中，AV0103 激光处理区的硬度和模量变化趋势原因 AV0102 类似.

AV0107 处理区的组织形貌见图 6. 从图 6 右边照片可看出，试样表面发生熔融，导致表面变形. 从图 6 左边照片可看出(从右到左)，可大致分成熔融区、相变区、过渡区和基体. 在熔融区，组织明显细化，为马氏体；表层片状石墨消失. 在相变区，组织细化；石墨变少和变小，主要是由于石墨融化不充分所致.

压痕试验结果和位置分别见图 5 和图 6. L1 离表面仅几个微米，同 L3 相比，硬度和模量较低. L2 和 L4 无测试结果. S 点落在 L8 和 L9 之间，且几乎与L9 压痕重合，L9 对其有硬化影响，故硬度最高. G1~G3 为过渡区的压痕.

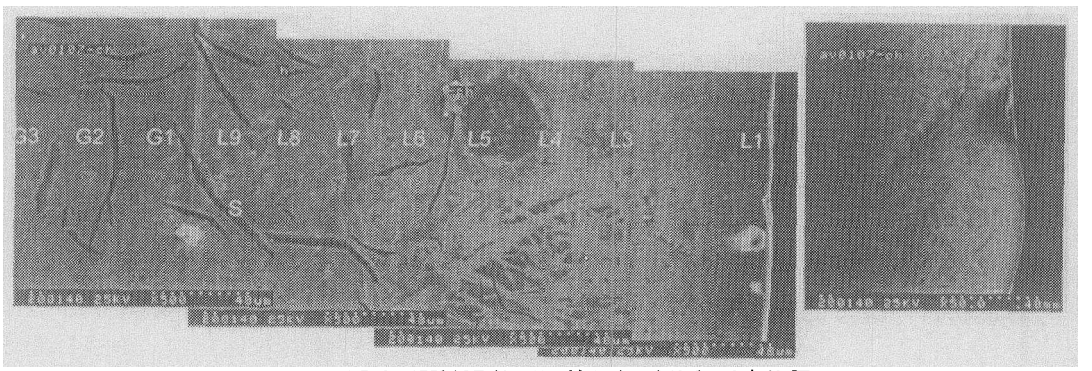


图 6 AV0107 处理区的组织形貌和压痕位置

## 3 结论

同显微硬度技术相比，纳米压痕试验技术能提供实时的载荷、硬度、模量等随压痕深度的变化. 和显微观察手段配合使用，可以研究较微小组织的力学性能. 这些为开展激光表面改性的力学性能研究提供一种新的测试手段.

**参 考 文 献**

1 关振中主编. 激光加工工艺手册. 北京:中国计量出版. 1998.133

2 www.mts.com/nano

3 虞钢,王红才,张凤林等. 一种具有柔性传输和多轴联动的激光加工装置. 中国专利 (已受理), 申请号: 98101217.5, 1998

# Nanoindentation Hardness and Modulus of Laser Surface Hardening Cast Iron

*ZHANG Taihua, GAN Cuihua, YU Gang YANG Yemin, SU Zhixiao, LIANG Naigang*

State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

**ABSTRACT** With the use of a Nanoindentation Testing Technique (NTT), the mechanical properties of the laser surface hardening cast iron are investigated. In comparison with the microhardness tests, the NTT can measure the real-time load on sample, hardness, modulus vs displacement into surface in the different microstructures of the laser surface hardening iron.

**KEY WORDS** laser hardening; iron; nanoindentation testing technique; hardness and modulus

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net