

30CrNi2MoVA 钢激光淬火区的力学性能研究

李怀学^{1,2}, 陈光南², 张坤², 罗耕星²

(1 北京航空制造工程研究所/高能束流加工技术国防重点实验室, 北京 100024;

2. 中国科学院力学研究所表面改性实验室, 北京 100080)

摘要: 利用纳米硬度计的连续刚度测量法研究了调质态 30CrNi2MoVA 高强度钢激光淬火区的力学性能。结果表明: 在加载条件和最大压入深度相同的条件下, 整个压入过程中激光相变硬化中心区的弹性模量和硬度随着压入深度基本保持不变, 其平均值比原始基体分别提高了 25% 和 145% 左右; 而原始基体和激光相变过渡区的弹性模量和硬度在 600 nm 左右的压入深度范围内随着压入深度增加; 在 600~1 500 nm 压入深度范围内, 三者的弹性模量随着压入深度基本趋向一致, 这与测得最大压入深度处卸载时的弹性模量相吻合。另外, 激光相变硬化区的硬度沿着淬火深度方向呈现梯度分布, 而其弹性模量在微观尺度上变化不大。

关键词: 钢; 激光相变硬化; 纳米压入; 硬度; 弹性模量

自 20 世纪 70 年代, 钢的激光相变硬化已在工农业中得到广泛的应用, 而且其组织特征性能研究也取得丰硕的成果: 在组织方面, 组织超细化, 晶体缺陷数目急剧增加, 碳化物数量和粒度减小甚至完全溶解等; 在性能方面, 硬度提高, 耐磨性以及抗疲劳性能提高等^[1]。由于测量技术上的限制, 在激光相变硬化区的性能研究方面, 往往局限于研究激光相变硬化表面的宏观性能, 而对钢的激光相变硬化组织对其微米尺度力学性能研究报道较少。

随着纳米压入技术的快速发展, 纳米硬度计为人们研究钢的纳微观力学性能提供了强有力的研究手段。它利用深度传感技术能够连续测量压入深度和载荷; 根据压入载荷—深度曲线推导出材料的力学性能参数^[2]。近 10 年来, 有关钢的纳米力学表征研究报道越来越多, 且大部分都是有关平衡态双相或多相钢的研究, 如 Randal、Choi 以及 Song 等人分别对奥氏体-铁素体不锈钢、APIX65 管线钢以及低碳低合金钢中各相的力学性能进行了研究^[3-5], OHMURA 和 Li 等对中碳钢中组织对纳米硬度分布以及基体强度进行了研究^[6-7]。然而, 有关钢的高能束(如激光)淬火获得的极度非平衡态组织的微观力学性能研究未见报道。为揭示钢基体激光离散预处理提供镀铬身管的延寿机制, 本文利用纳米硬度计的连续刚度测量法研究了调质态 30CrNi2MoVA 钢激光相变硬化区的力学性能, 阐释激光淬火提高基体的抵抗变形和承载能力。

1 实验方法

激光淬火钢材料为调质状态的 30CrNi2MoVA 钢, 其主要化学成分为(质量百分比 wt. %): 0.28C, 0.7Cr, 2.27Ni, 0.20 Mo, 0.21 V, 其余为 Fe。激光淬火钢板的尺寸为: 40 mm×40 mm×15 mm。利用额定功率为 500 W 的 YAG 固体激光器。激光淬火工艺参数如下: 功率 150 W, 光斑大小 0.5 mm 左右, 扫描速度 25 mm/s, 相邻激光淬火带间距 0.5 mm 左右。随后对淬火钢板在 200℃ 保温 2 个小时去应力回火, 然后用线切割机把钢板切成 20 mm×20 mm×15 mm 小试样。最后激光淬火带的横界面被研磨、抛光。利用 2% 硝酸酒精腐蚀剂观察激光淬火带横界面的微观组织特征。

利用光学显微镜和 FEI Serio 400 高分辨扫描电镜观察调质状态的 30CrNi2MoVA 钢激光相变强化区的组织特征; 利用 MTS Nano IndenterXP 纳米硬度计的连续刚度测量法测试激光相变硬化区、过渡区以及原始基体的不同压痕深度的硬度和弹性模量, 压头采用 Berkovich 三角锥金刚石压头, 其主要控制参数为: 预先设置最大压入深度为 1.5 μm, 压入过程中的控制方式采用 0.05/s 恒应变率。为保证实验的可靠性, 在上述三个区域各重复 5 次实验。

2 实验结果和讨论

2.1 显微组织

图1显示了调制态30CrNi2MoVA钢激光相硬化后横截面微观组织的金相图片。图1(a)中月牙状的区域为激光相硬化区；由于激光光束的能量密度分布是高斯分布，月牙状的激光相硬化区微观组织结构呈现梯度分布。与其他区域相比，激光相硬化区组织超细化(见图1(b))，且尺寸相对较小。当激光相硬化区被加热到奥氏体化温度以上时，部分碳化物发生分解，其中一些碳原子固溶到奥氏体中，因激光处理极快的加热和冷却速度，当奥氏体转变为马氏体时，碳原子来不及析出而仍固溶在马氏体中。另外，原始基体由片状回火索氏体和碳化物组成，如图1(e)所示。原始基体中的碳化物主要有两类：一类是 Fe_3C ，其形貌呈长条状；另一类是复合碳化物 M_xC ，主要是V、Cr等的碳化物，其形貌呈球状。

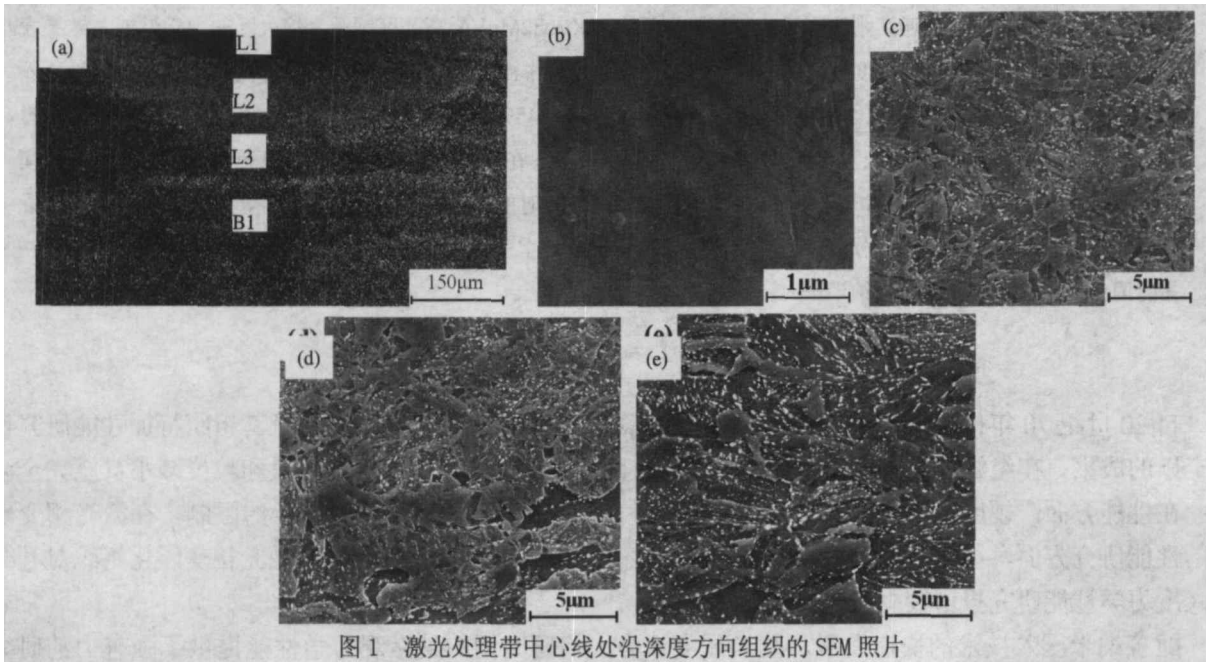


图1 激光处理带中心线处沿深度方向组织的SEM照片

2.2 力学性能

图2显示了在激光处理区和原始基体上的压痕及其位置，其中L1、L2表示激光处理区的不同深度处压痕，B1表示原始基体的压痕。图3显示L1、L2和B1位置的典型载荷-压入深度曲线。由图可知：在达到最大压入深度时，三个区域所需要的最大载荷明显不同，其中L1处所需载荷值最大，而B1所需载荷值最小。另外，随着压入深度增加，对激光处理区与原始基体所施加的载荷之差越来越大，这表明激光相硬化能够大幅度提高钢的抵抗变形能力。

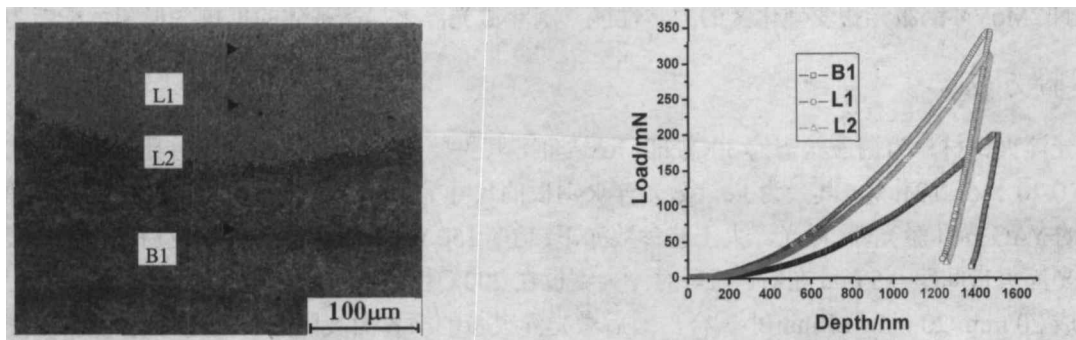


图2 激光处理区和原始基体上压痕及位置

图3 L1、L2和B1位置的典型载荷-压入深度曲线

图4显示L1、L2和B1三个区域典型的硬度、弹性模量-压入深度曲线。由图可知：在加载条件和最大压入深度相同的条件下，整个压入过程中L1区的硬度随着压入深度基本保持不变；L2和B1两个区域的硬度在大约600 nm压入深度范围内随着压入深度而增加，在600~1500 nm压入深度范围内，两者的硬度随着压入深度基本趋向某一稳定值，这是因为这两个区域的碳化物直径大小与压入深度处在同一数量级，碳化物尺度效应导致这种特殊现象。因此，在亚微米尺度进行纳米压入硬度实验时，基体表层微区的

组织不均匀性对其纳米硬度影响较大。对成分相同而组织不同的材料来说,激光相变硬化区的承载能力强不仅可以用其高硬度定性说明,而且还可利用纳米硬度计的连续刚度测量法动态测量的载荷和压入深度定量表征。整个压入过程中激光相变硬化中心区 L1 弹性模量随着压入深度基本保持不变,这与硬度-压入深度变化规律相一致;L2 和 B1 两个区域的弹性模量在大约 600nm 压入深度范围内随着压入深度增加,而且两者的弹性模量基本接近;在 600~1 500 nm 压入深度范围内,L1、L2 和 B1 三个区域的弹性模量随着压入深度基本趋于一致。这充分表明:在亚微米尺度上,当碳化物的尺寸与压入深度的在同一数量级时,钢的弹性模量受到不同相的影响较大,而在微米尺度上受到的影响较小。

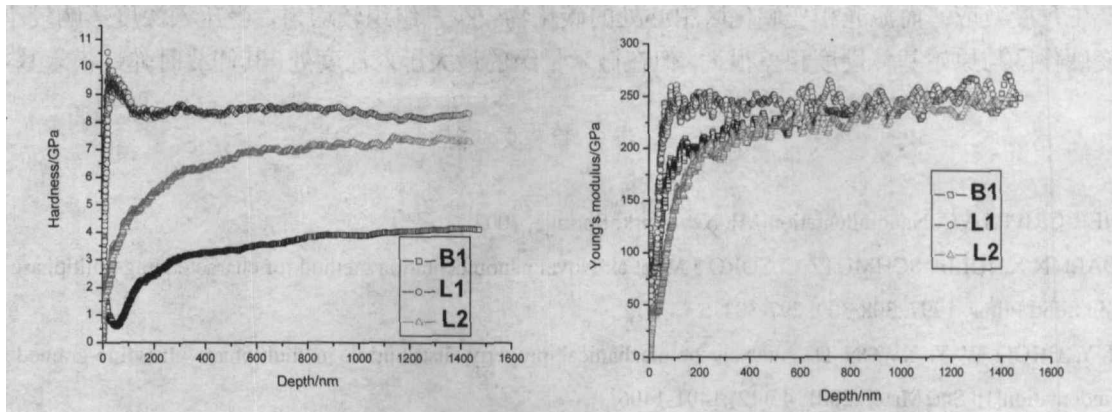


图 4 L1、L2 和 B1 区典型的硬度、弹性模量-压入深度曲线

表 1 原始钢与激光相变硬化区的纳米压入硬度和弹性模量

| Location | E Average /GPa over defined range | H Average /GPa over defined range | Modulus /GPa from unloading | Hardness /GPa from unloading |
|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| L1 | 233.759 | 6.7896 | 251.536 | 7.0332 |
| L2 | 185.8684 | 4.3982 | 244.938 | 6.596 |
| B1 | 186.609 | 2.769 | 246.497 | 4.097 |

表 1 显示了激光相变硬化区和原始基体的硬度和弹性模量的平均值。不论卸载时测试的纳米压入硬度还是动态连续测试的硬度及其平均值,激光相变硬化区的硬度都是沿着硬化深度方向呈梯度分布,这与常规的显微硬度测试结果一致;而且激光相变硬化中心区 L1 的平均硬度比原始钢基体的平均硬度提高了一倍多。另外,激光相变硬化中心区域的全程平均硬度与卸载时的硬度相差不大,而在其他区域的两者的相差高达 1 GPa 以上。由表 1 可知:激光相变中心区 L1 的全程平均弹性模量比原始钢基体的平均弹性模量提高了 25% 左右;卸载时,L1 处的弹性模量虽然与其他区域的弹性模量相差不大,但仍然高于其他区域的弹性模量;无论动态测量的弹性模量还是卸载时的弹性模量,L2 处的弹性模量都略小于 B1 处的弹性模量,而前者的硬度比后者的硬度高出 2 GPa 左右。其原因是激光相变硬化中心区的碳化物绝大部分溶解到基体中,组织微区相对较均匀,压入过程中受到碳化物等的尺度效应影响较小;而其他区域微区组织的不均匀,压入过程中受到不均匀组织的尺度效应较大;激光相变硬化区中心的组织超细化、高缺陷密度以及较大的晶格畸变都对其力学性能产生重要的影响。

2.3 讨论

纳米硬度计的连续刚度法可揭示材料组织对纳微米力学性能的影响;在研究钢的纳微米力学性能时,必须首先考虑钢的组织特征,以便选择不同的载荷和压入深度,尽量避免组织结构不均匀所带来的尺度效应。激光相变硬化区沿着硬化深度方向为梯度性的组织结构,其相应的硬度和弹性模量等力学性能也呈现梯度性分布。S. Suresh^[10]曾详细报道了梯度表面材料提高接触耐磨性以及抗疲劳性能的机理,并提出通过成分梯度、组织结构梯度等提高其表面性能。正是激光相变硬化区的特殊的梯度组织结构及力学性能赋予了激光淬火的表面具有良好的耐磨性和抗疲劳性能。利用激光相变硬化层作为次表层大幅度镀铬身管的寿命,其中激光相变硬化区特殊的梯度组织结构及性能是其延寿的关键因素。这是因为激光相变硬化区的组织结构不仅能够改善初始镀铬层的组织形貌特征^[11];而且其特殊的纳微米力学性能不仅提高其承载能力,

缓解钢基体/镀铬层界面处力学性能的突变,而且可减少在高温高压等极端载荷条件下因热机失配而导致应力集中,从而缓解镀铬层的开裂和剥落。

3 结论

(1) 利用连续刚度测量法,可测试激光淬火区的力学性能,动态评价激光相变硬化区的抵抗变形和承载能力。

(2) 调质态 30CrNi2MoVA 高强度钢含有多相结构,在亚微米压入范围内,碳化物等颗粒相对纳米压入数据产生尺度效应;而激光相变硬化区中心处的碳化物较少,组织较均匀,受压入深度影响较小。尽管激光相变硬化区与原始基体硬度相差很大,但在微米量级的最大压入深度处,其卸载时弹性模量基本一致。

参 考 文 献

- [1] FISCHER-CRIPPS A C. Nanoindentation[M]. New York: Springe, 2002.
- [2] RANDALL N X, JULIA-SCHMUTZ C, SORO J M, et al. Novel nanoindentation method for characterising multiphase materials [J]. Thin Solid Films, 1997, 308-309: 297-303.
- [3] CHOI Y, CHOO W Y, KWON D. Analysis of mechanical property distribution in multiphase ultra-fine-grained steels by nanoindentation[J]. Scr. Mater, 2001, 45(12):1401-1406.
- [4] 宋洪伟, 史弼, 王秀芳, 张俊宝. 一种低碳低合金钢的纳米压痕表征[J]. 金属学报, 2005, 41(3):287-292.
- [5] OHMURA T, TSUZAKI K, MATSUOKA S, Evaluation of the matrix strength of Fe-0.4%C tempered martensite using nanoindentation techniques[J]. Phil. Mag A, 2002, 82(10):1903-1910.
- [6] LI J, OHMURA T, TSUZAKI K. Microstructure effect on nanohardness distribution for medium-carbon martensitic steel [J]. Science in China: Series E Technological Sciences, 2006, 49(1):10-18.
- [7] DAHOTRE B. N. Lasers in Surface Engineering[M]. ASM international. 1998.
- [8] 陈光南, 罗耕星, 张 坤等. 提高镀铬身管寿命的激光强化新方法[J]. 兵工学报(增刊), 2003, 12:6-10.
- [9] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. J Mater Res, 1992, 7:1564-1583.
- [10] SURESH S. Graded Materials for Resistance to Contact Deformation and Damage[J]. Science, 2001, 292 (29):2447-2451.
- [11] 李怀学, 陈光南, 张国祥等. 初始镀铬层的基体溶解法研究[J]. 材料热处理学报, 2006, 2:119-123.

Mechanical Properties of Laser-quenched Zones of 30CrNi2MoVA Steel

Li Huaixue, Chen Guangnan, Zhang Kun, Luo Gengxing

Abstract: The continuous stiffness measurement (CSM) of a nanoindenter was used to characterize the nano/micro-mechanical properties of laser-quenched zones of quenched and tempered 30CrNi2MoVA steel. The results show that under the identical loading and maximum penetration depth conditions, Young's modulus and Hardness of laser-transformation central zones almost remains constant with increasing of penetration depth during the whole loading process and their averages are increased by about 25% and 145% that those of original steel, respectively; Young's modulus and Hardness of original steel and laser-transformation transition zones are rising with increasing of penetration depth in the about 600nm depth range; while Young's modulus of the above three regions tends to the identical value in the depth range of 600nm~1500nm, which is accordance with the unloading Young's modulus measured at the maximum penetration depth. In addition, although the hardness distribution of laser-quenched regions is graded along the quenching depth, their modulus almost is constant in the microscopic level.

Key words: steel; laser-transformation hardening; nanoindentation; hardness; young's modulus

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50531060); 国防重点实验室基金资助项目(2009319)

第一作者简介: 李怀学, 男, 1977年生, 博士, 从事激光加工及快速制造研究。

电话: 010-85701574。E-mail: lhx1022@126.com