

# 不同金相组织 12Cr1MoV 的等离子体特性

戴 沅<sup>1</sup> 李 军<sup>2</sup> 钟万里<sup>1</sup> 董 璇<sup>2</sup> 李文胜<sup>1</sup> 姚顺春<sup>2</sup> 陆继东<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup> 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510600)  
(<sup>2</sup> 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要** 选用珠光体耐热合金钢 12Cr1MoV 作为研究对象,通过不同的热处理过程制备了金相组织为珠光体+铁素体、板条状回火马氏体+少量残余奥氏体、回火马氏体和回火索氏体的样品,对比分析了激光诱导击穿光谱(LIBS)的谱线强度、等离子体温度、电子密度以及 Fe 元素离子线和原子线谱线强度比与金相组织之间的关系。研究结果表明:回火马氏体的光谱强度最强,珠光体+铁素体和板条状回火马氏体+少量残余奥氏体的光谱强度接近,回火索氏体的光谱强度最弱;各样品的等离子体温度基本一致;回火马氏体的电子密度最大,其余样品电子密度基本一致;Fe 元素离子线和原子线强度比与金相组织存在一定的关联性,说明 LIBS 技术具有分析锅炉受热面金相组织变化的潜在能力。

**关键词** 光谱学;激光诱导击穿光谱;金相组织;12Cr1MoV;硬度;等离子体特性

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0330003

## Plasma Characteristics of Different Microstructures of Steel 12Cr1MoV

Dai Yuan<sup>1</sup> Li Jun<sup>2</sup> Zhong Wanli<sup>1</sup> Dong Xuan<sup>2</sup> Li Wensheng<sup>1</sup>

Yao Shunchun<sup>2</sup> Lu Jidong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510600, China)  
(<sup>2</sup> School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

**Abstract** The pearlitic heat resistant steel 12Cr1MoV is chosen as the research object. Different microstructure samples are made by different heat treatment processes. The microstructures of these samples are pearlite and ferrite, lath martensite and a small amount of residual austenite, martensite and sorbite. The spectral intensity of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), plasma temperature, electron density and the relation between microstructure and the ionic to atomic spectral line intensity ratio of Fe element are compared and analyzed. The experimental results show that the spectral intensity of martensite is strongest, the spectral intensity of ferrite and pearlite is almost similar to that of lath martensite and a small amount of residual austenite, the spectral intensity of sorbite is weakest. The plasma temperatures of samples are almost consistent. The electron density of martensite is the maximum and those of remaining samples are similar. There is a certain correlation between Fe ionic and atomic line intensity ratio and microstructure, which indicates that LIBS has the potential to be used as detection tool of microstructure variation of heat transfer surfaces in power plant boilers.

**Key words** spectroscopy; laser induced breakdown spectroscopy; metallographic structure; 12Cr1MoV; hardness; plasma properties

**OCIS codes** 300.6365; 300.2140; 300.6170; 300.6210

## 1 引 言

随着我国电力工业的发展,高参数大容量火电

机组相继投入运行,电站金属部件的安全可靠运行一直是电厂十分关注的问题。目前大型电站锅炉中

收稿日期: 2013-09-04; 收到修改稿日期: 2013-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(51071069,51206055)、中央高校基本科研业务费(2012ZM0014)

作者简介: 戴 沅(1966—),女,本科,高级工程师,主要从事电力设备材料及性能、电力设备检测等方面的研究。

E-mail: daiy1997@163.com

\* 通信联系人。E-mail: jdllu@scut.edu.cn

比较常用的 12Cr1MoV 作为一种珠光体耐热钢,广泛应用于火力发电厂制造的蒸气温度不超过 540 ℃ 的集箱、蒸气管道,管壁温度不超过 580 ℃ 的过热器、再热器等<sup>[1]</sup>。12Cr1MoV 常见的组织变化有石墨化、球化、固溶体合金元素的贫化、碳化物析出和聚集、相类型的转变以及再结晶等<sup>[2]</sup>。受热面材料组织结构的变化会导致机械性能的下降。传统的分析方法是割管后进行后期的一系列复杂的处理过程,得到其金相组织。本文将激光诱导击穿光谱检测技术(LIBS)应用到金相组织的特性分析中,分析不同金相组织结构的 12Cr1MoV 的激光等离子体特性,探讨将 LIBS 特性分析用于区分 12Cr1MoV 样品不同金相组织结构的可行性。

LIBS 是一种原子发射光谱分析技术,由于其具有分析速度快,对样品损伤小等优点,被广泛应用于定性<sup>[3]</sup>和定量分析<sup>[4-6]</sup>。同时,LIBS 受基体效应影响显著,样品的物理形态和化学组成均是产生基体效应的影响因素,如粒径大小<sup>[7-8]</sup>、表面粗糙度<sup>[9]</sup>以及元素间相互影响<sup>[10]</sup>等。

正是由于基体效应的存在,等离子体光谱信号才有可能定性地表征基体材料的特性。国内外已有研究者利用基体效应将等离子体光谱信号应用到材料特性的研究中。Labutin 等<sup>[11-12]</sup>为了修正样品特性对金属样品分析的影响,选用不同硬度铝合金材料研究其激光诱导等离子体特性,得到样品的烧蚀量、特征元素的光谱信号强度和样品的硬度有关的结论,并提出通过烧蚀量能反映材料的机械性能。Abdel-Salam 等<sup>[13-14]</sup>研究发现,激光等离子体冲击波的性质与样品的硬度有关,并利用 Ca 和 Mg 的离子线与原子线强度比和样品硬度的变化规律来区分牙齿牙釉质、贝壳和蛋壳三种不同的钙化组织。潘圣华等<sup>[15]</sup>为了研究金相组织对 LIBS 定量分析的影响,选取热处理后得到的珠光体+铁素体、贝氏体和马氏体 3 种不同金相组织的 45 号钢,研究样品的 LIBS 等离子体光谱特性随激光能量的变化趋势。Yao 等<sup>[16-17]</sup>研究了热处理后金相组织为马氏体和珠光体+铁素体的 20 号钢,分析了样品的光谱特性,并选取不同的波段进行主成份分析法(PCA)分析,以区分两种不同金相组织的样品。李俊彦等<sup>[18]</sup>为了研究机械性能对光谱特性的影响,通过热处理制备不同硬度的 12Cr1MoV 钢样品,得到离子线和原子线强度比随着样品硬度的增加而增强,等离子体温度随硬度的增大而升高的结论。

在火力发电行业,金属材料在服役过程中微观

结构和力学性能等的变化均会对其使用寿命产生直接影响。本文研究 12Cr1MoV 材料的金相组织结构对激光诱导击穿光谱的等离子体特性和光谱特性的影响,从而为 LIBS 应用于现场服役受热面材料金相组织的检测提供依据。

## 2 实验介绍及样品制备

### 2.1 实验介绍

实验台架如图 1 所示。激光光源为 Nd:YAG 固体脉冲调 Q 激光器(Quantel, EaZy),工作波长 1064 nm,脉宽 5 ns,单次脉冲最大激光能量为 330 mJ,频率在 1~10 Hz 连续可调,实验采用 1 Hz 脉冲。光纤光谱仪选用荷兰 Avantes 公司 AvaSpec-2048FT-8-RM,波长范围 175~1075 nm,光谱分辨率 0.05~0.1 nm[半峰全宽(FWHM)],最小积分时间 2 ms,其中光谱仪是由激光器的 Q 信号触发。实验时收光角度为 45°,等离子体信号通过收光透镜聚焦后被光纤接收并传输到计算机中进行保存、分析。实验装置还包括 45°放置的 1064 nm 高反镜,聚焦透镜 1(直径  $D=25.4$  mm,焦距  $f=75$  mm),聚焦透镜 2(直径  $D=50.8$  mm,焦距  $f=100$  mm)和光纤探头等。激光出光时光斑直径  $d_1=4$  mm,经过聚焦透镜 1 聚焦之后,在聚焦点光斑直径  $d_2=0.04878$  mm。

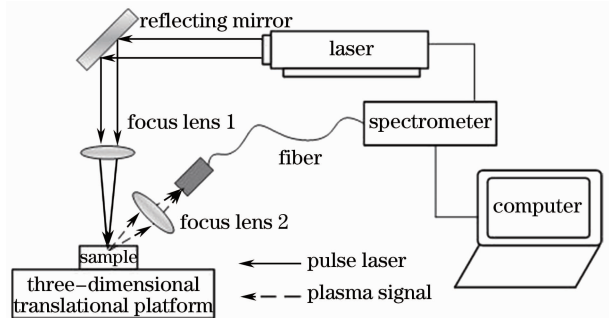


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

### 2.2 样品制备

实验选用火力发电厂亚临界锅炉常用的珠光体耐热合金钢 12Cr1MoV,其主要化学成分如表 1 所示(GB/T3077-1999)。原材料不做任何热处理,其余样品进行水冷淬火和回火处理以获得不同金相组织结构的 12Cr1MoV 样品。淬火过程是将样品放入已升温至 970 ℃ 的马弗炉中保温 10 min,然后取出水冷。回火过程是将上述已经淬火处理过的样品,放入马弗炉逐渐加温至 750 ℃,保温 2 h 后取出空冷,得到回火温度为 750 ℃ 的实验样品。依次重

复回火操作,调整回火温度分别至 400 ℃和 200 ℃,得到回火温度分别为 400 ℃和 200 ℃的样品。

然后用金相显微镜观察上述样品的金相组织,样品金相组织图(放大 500 倍)如图 2 所示。

表 1 12Cr1MoV 化学成分表(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 12Cr1MoV (mass fraction, %)

| Element | C         | Si    | Mn    | Cr          | Mo        | V         | S      | P      | Ni    | Cu    |
|---------|-----------|-------|-------|-------------|-----------|-----------|--------|--------|-------|-------|
| Content | 1.45~1.70 | ≤0.40 | ≤0.40 | 11.00~12.50 | 0.40~0.60 | 0.15~0.30 | ≤0.030 | ≤0.030 | ≤0.25 | ≤0.30 |

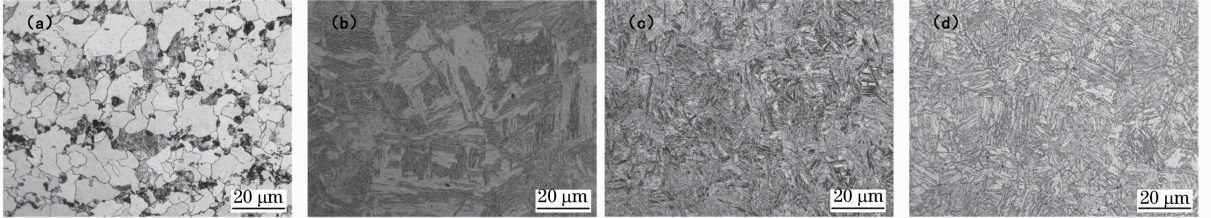


图 2 样品的金相组织图。(a)珠光体+铁素体;(b)板条状回火马氏体+少量残余奥氏体;(c)回火马氏体;(d)回火索氏体

Fig. 2 Microstructure figures of samples. (a) Pearlite and ferrite; (b) lath martensite and a small amount of residual austenite; (c) martensite; (d) sorbite

图 2(a)为原材料的金相组织图,可以清晰地看到片层状排列分布的珠光体和铁素体(ZGT+TST)。图 2(b)~(d)对应回火温度为 200 ℃、400 ℃和 750 ℃的 12Cr1MoV,图 2(b)中有许多板条状结构的马氏体(呈暗黑色针状分布)和少量残余奥氏体(MST+AST)。从图 2(c)可以看出碳已经部分从固体中析出并形成过渡碳化物,其金相组织结构为回火马氏体(HHMST)。从图 2(d)可以看到多边铁素体上分布着碳化物,其金相组织为回火索氏体(HHSST)<sup>[19]</sup>。原材料和不同回火温度时样品金相组织如表 2 所示。

表 2 样品金相组织

Table 2 Microstructures of samples

| Number  | Tempering temperature /℃ | Microstructure                                       |
|---------|--------------------------|--|
| ZGT+TST | --                       | Pearlite+ferrite                                     |
| MST+AST | 200                      | Lath martensite+a small amount of residual austenite |
| HHMST   | 400                      | Martensite   |
| HHSST   | 750                      | Sorbite  |

为了减小空气击穿对等离子体信号的影响,调节聚焦透镜 1 使其焦点位于样品下方 3 mm 处,实验时激光能量为 68.08 mJ,相对标准偏差(RSD)为 0.987%,在信噪比最佳的延迟条件 1800 ns 下采集数据,积分时间 2 ms,为了提高分析数据的代表性,每个样品击打 5 点,每点连续击打 50 次,将 5 点的 50 个数据平均后作为该样品的数据。在上述实验条件下,激光在样品靶表面的光斑直径  $d_3 = 0.16$  mm,功率密度为  $5.64 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 特征谱线强度

图 3 是激光作用于原材料样品的等离子体光谱图(250~430 nm),结合原子光谱标准和数据库<sup>[20]</sup>(国家标准技术研究所,NIST),可以得到在该波段范围内有基体元素 Fe,合金元素 Cr、Mn、Mo、V 的特征光谱,选用图中部分谱线作为分析谱线,对其光谱强度进行分析,选择基体元素 Fe 以及合金元素 Mn、Mo 和 Cr 的特征谱线进行分析。所选元素的特征谱线如表 3 所示。

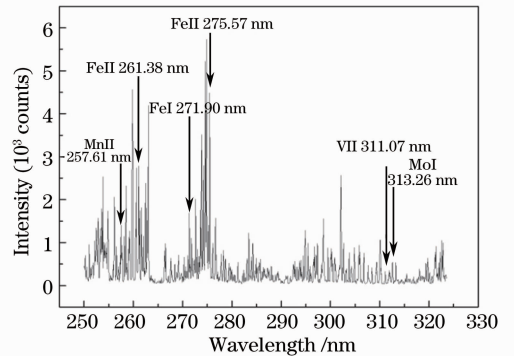


图 3 原材料的光谱图(250~430 nm)

Fig. 3 Spectrum of raw material (250~430 nm)

表 3 所选分析元素的特征谱线

Table 3 Spectral lines of the analyzed elements

| Spectral line /nm | Spectral line /nm |
|-------------------|-------------------|
| FeI 373.486       | MnII 257.610      |
| FeI 376.379       | MnI 404.136       |
| FeI 404.581       | MoI 313.259       |
| FeII 261.382      | CrII 283.563      |
| FeII 271.441      | CrI 425.435       |

为了分析激光与不同金相组织 12Cr1MoV 样品的激光等离子体特性差异,对比分析各样品之间的基体元素 Fe 和合金元素 Cr, Mn 的谱线强度,如图 4 所示。

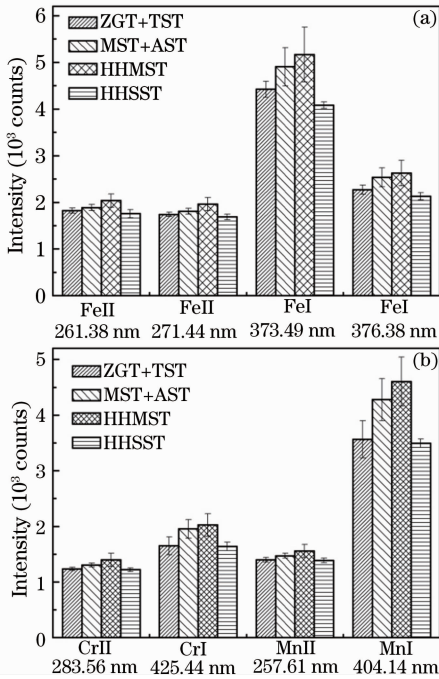


图 4 样品谱线强度

Fig. 4 Spectral line intensities of samples

由图 4 可以看出,不同金相组织样品的谱线强度存在一定的差异,而且不同谱线的差异度不同,表现为回火马氏体的光谱强度最强,珠光体+铁素体和板条状回火马氏体+少量残余奥氏体的光谱强度比较接近,回火索氏体的光谱强度最弱,且基体元素 FeI 373.486 nm 和合金元素 MoI 404.136 nm 的谱线强度差异度大于其余分析谱线。

### 3.2 等离子体温度和电子密度

等离子体温度和电子密度是表征等离子体特性的重要参数,可以进一步揭示激光与样品的相互作用的过程。

选取 Fe 元素的几条原子线用来建立玻尔兹曼平面, Aydin 等<sup>[21]</sup>提出了一种系统方法筛选系列的 Fe 元素谱线,以提高计算等离子体温度的准确度,选用的 Fe 的几条谱线参数如表 4 所示。

由表 4 中选择的谱线强度和对应的参数,利用玻尔兹曼平面法计算等离子体温度,各样品的等离子体温度的玻尔兹曼平面如图 5 所示,  $I$  为特征谱线光谱强度,  $g$  为上能级的简并度,  $A$  为跃迁几率。

珠光体+铁素体、板条状回火马氏体+少量残余奥氏体、回火马氏体和回火索氏体的玻尔兹曼平

面的拟合度分别为 0.988、0.989、0.991 和 0.993, 由拟合直线的斜率计算得到的等离子体温度分别为  $(8229 \pm 178)$  K、 $(8093 \pm 91)$  K、 $(8226 \pm 138)$  K 和  $(8203 \pm 70)$  K 无明显的区别。

表 4 计算等离子体温度所用 Fe 的原子谱线

Table 4 Selected atomic lines of Fe for the plasma temperature calculation

| Wavelength<br>$\lambda$ / nm | Transition<br>probability<br>$A_{ki} / (10^8 \text{ s}^{-1})$ | Upper level<br>$E_k / \text{eV}$ | Degeneracy of<br>upper level<br>$g_k$ |
|------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|
| 342.712                      | 0.549   | 5.793                            | 9                                     |
| 347.545                      | 0.070   | 3.654                            | 5                                     |
| 349.057                      | 0.044   | 3.603                            | 7                                     |
| 351.382                      | 0.034   | 4.387                            | 11                                    |
| 365.147                      | 0.623   | 6.153                            | 9                                     |
| 367.763                      | 0.801   | 6.129                            | 5                                     |
| 376.554                      | 0.969   | 6.529                            | 15                                    |
| 384.997                      | 0.605   | 4.231                            | 1                                     |
| 385.637                      | 0.046   | 3.266                            | 5                                     |

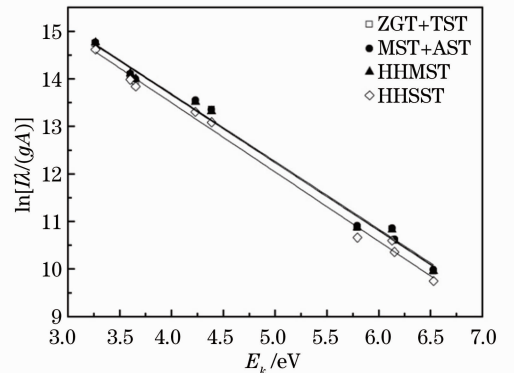


图 5 样品的玻尔兹曼平面图

Fig. 5 Boltzmann plots of samples

电子密度是描述等离子体特性的一个至关重要的参数<sup>[22]</sup>,电子密度与光谱 FWHM 有关,对于等离子体来说,主要是粒子间相互碰撞形成的 Stark 宽度<sup>[23]</sup>,采用 Stark 展宽计算电子密度,计算公式如下<sup>[24]</sup>:

$$n_e = [C_0 + C_1 \times \ln \Delta\lambda + C_2 (\ln \Delta\lambda)^2 + C_3 (\ln \Delta\lambda)^3] \Delta\lambda^{3/2} \times 10^{13}, \quad (1)$$

式中  $\Delta\lambda$  为特征谱线的 FWHM,  $n_e$  为电子密度,  $C_0 = 36.84, C_1 = -1.430, C_2 = 0.0089$ 。采用 SiI 390.552 nm 的半峰全宽计算电子密度,在基于 1800 ns 延迟和 2 ms 积分时间下的光谱强度,计算得到的各样品的电子密度如图 6 所示。

图 6 中回火马氏体的电子密度最大,其余样品的电子密度相差不大。光谱强度与等离子体温度和电子密度有关,在等离子体温度一定的情况下,电子



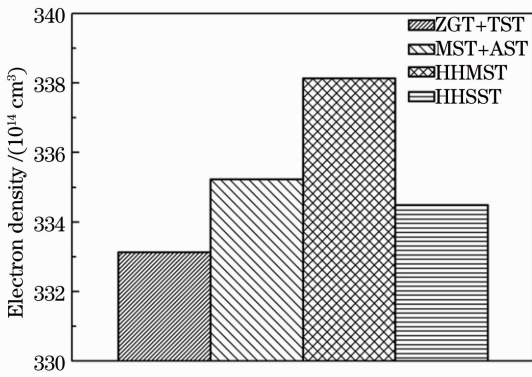


图 6 样品的电子密度

Fig. 6 Electron densities of samples

密度越大,光谱强度越强。由图 5 可知,样品的等离子体温度基本一致,而图 6 中回火马氏体的电子密度最大,则可得到回火马氏体的光谱强度最强,图 4 的结果正验证了这一点。

### 3.3 谱线强度比

由于实验中采用八通道光谱仪,为了避免光谱仪各通道响应特性不同带来的影响,将 FeII 261.382 nm、FeII 271.441 nm、FeI 282.328 nm、FeI 376.379 nm 的光谱强度进行通道内的归一化处理后求取原子线和离子线之间的比值,得到离子线和原子线的比值和金相组织之间的关系如图 7 所示。

图 7 中所示的 FeII 261.382 nm/FeI 282.328 nm、FeII 261.382 nm/FeI 376.379 nm、FeII 271.441 nm/

FeI 376.379 nm 的比值与金相组织存在一定的关系,表现为离子线和原子线的比值中板条状回火马氏体+少量残余奥氏体最大,回火马氏体和回火索氏体次之,原材料的最小。

## 4 结 论

为了研究不同金相组织受热面材料的激光诱导击穿光谱特性,选用珠光体耐热合金钢 12Cr1MoV 作为研究对象,通过热处理得到金相组织分别为珠光体+铁素体、板条状回火马氏体+少量残余奥氏体、回火马氏体和回火索氏体的样品。对比分析了基体元素 Fe 和合金元素 Mn、Cr 的谱线强度、等离子体温度、电子密度以及 Fe 元素离子线和原子线谱线强度比与金相组织之间的关系。研究结果表明:对于基体元素 Fe 和合金元素 Mn、Cr 来说,回火马氏体的光谱强度最强,珠光体+铁素体和板条状回火马氏体+少量残余奥氏体的光谱强度接近,回火索氏体的光谱强度最弱;各样品的等离子体温度基本一致;回火马氏体的电子密度最大,其余样品电子密度基本一致;Fe 元素离子线和原子线强度比与金相组织存在一定的关联性,表现为 Fe 元素离子线和原子线的比值板条状回火马氏体+少量残余奥氏体最大,回火马氏体和回火索氏体次之,原材料的最小。

## 参 考 文 献

- Ye Youjun, Gong Jianming, Jiang Yong. Carbide transformation rule of 12Cr1MoV steel serviced for long-termat high temperature studied by isothermal aging simulation [J]. Materials for Meechanical Engineering, 2009, 33(12): 20-23.
- 叶有俊, 巩建鸣, 姜 勇. 等温时效模拟研究 12Cr1MoV 钢在长期高温服役过程中碳化物的转变规律[J]. 机械工程材料, 2009, 33(12): 20-23.
- Wei Xicheng, Ma Shiwei. Grain evolution of 12Cr1MoV steel and its effect on tensile properties [J]. Physics Examination and Testing, 2006, 24(6): 1-3.
- 韦习成, 马世伟. 12Cr1MoV 钢的晶粒大小演化及对拉伸性能的影响[J]. 物理测试, 2006, 24(6): 1-3.
- Yan Jing, Ding Lei, Ge Linlin, *et al.*. Research about analysis of heavy metals in liquid jet by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0215001.
- 闫 静, 丁 蕾, 葛琳琳, 等. 液体射流激光击穿光谱检测重金属研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0215001.
- Akira Kuwako, Yutaka Uchida, Katsuji Maeda. Supersensitive detection of sodium in water with use of dual-pulse laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Appl Opt, 2003, 42(30): 6052-6056.
- Lin Yongzeng, Yao Mingyin, Chen Tianbing, *et al.*. Detection of Cu and Cr in the soil of navel orange plantation in gannan by LIBS [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 053002.
- 林永增, 姚明印, 陈添兵, 等. 激光诱导击穿光谱检测赣南脐橙种植土壤的 Cu 和 Cr [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5):

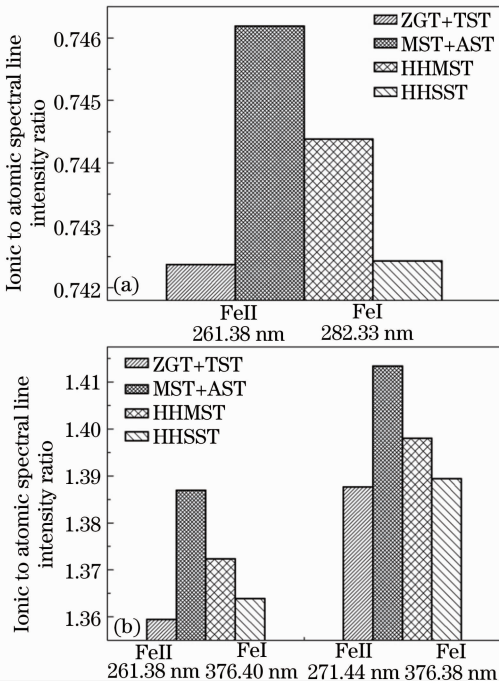


图 7 离子线与原子线的比值与金相组织的关系

Fig. 7 Relation between the microstructure and the ionic to atomic spectral line intensity ratio

- 053002.
- 6 Wang Chunlong, Liu Jianguo, Zhao Nanjing, *et al.*. Quantitative analysis of laser-induced breakdown spectroscopy of heavy metals in water based on support-vector-machine regression [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, (3): 0330002.  
王春龙, 刘建国, 赵南京, 等. 基于支持向量机回归的水体重金属激光诱导击穿光谱定量分析研究[J]. *光学学报*, 2013, (3): 0330002.
- 7 Xie Chengli, Lu Jidong, Li Jie, *et al.*. Study on the property of laser-induced plasma of pulverized coal [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(2): 133–136.  
谢承利, 陆继东, 李捷, 等. 激光诱导煤粉等离子体的特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(s2): 133–136.
- 8 Li Jun, Lu Jidong, Yao Shunchun, *et al.*. The study on the laser-induced breakdown spectroscopy properties of compound fertilizer with different physical forms [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(4): 881–885.  
李军, 陆继东, 姚顺春, 等. 不同物理形态复合肥的激光诱导击穿光谱特性分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(4): 881–885.
- 9 I Rauschenbach, V Lazic, S G Pavlov, *et al.*. Laser induced breakdown spectroscopy on soils and rocks; influence of the sample temperature, moisture and roughness [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2008, 63(10): 1205–1215.
- 10 J Vrenegor, R Noll, V Sturm. Investigation of matrix effects in laser-induced breakdown spectroscopy plasmas of high-alloy steel for matrix and minor elements [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2005, 60(7-8): 1083–1091.
- 11 Timur A Labutin, Andrey M Popov, Dmitriy N Sychev, *et al.*. Correlation between mechanical properties of aluminum alloys and characteristics of laser-induced plasma [C]. *Advanced Laser Technologies*, 2007.
- 12 Timur A Labutin, Andrey M Popov, Vasily N Lednev, *et al.*. Correlation between properties of a solid sample and laser-induced plasma parameters [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2009, 64(10): 938–949.
- 13 Z Abdel-Salam, M Abdelhamid, S M Khalil, *et al.*. LIBS new application; determination of metallic alloys surface hardness [C]. *The 7th International Conference on Laser Applications-ICLA 2009*, 2009, 1172: 49–52.
- 14 Z A Abdel-Salam, Z Nanjing, D Anglos, *et al.*. Effect of experimental conditions on surface hardness measurements of calafied tissues via LIBS [J]. *Appl Phys B*, 2009, 94(1): 141–147.
- 15 Pan Shenghua, Lu Jidong, Yao Shunchun, *et al.*. Impact of metallurgical structure on laser introduced steel plasma [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(8): 2126–2130.  
潘圣华, 陆继东, 姚顺春, 等. 金相组织对激光诱导钢铁等离子体的影响[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 2126–2130.
- 16 Shunchun Yao, Jidong Lu, Kai Chen, *et al.*. Study of laser-induced breakdown spectroscopy to discriminate pearlitic/ferritic from martensitic phases [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(7): 3103–3110.
- 17 Yao Shunchun. *The Application of Laser Induced Breakdown Spectroscopy for Diagnosis of Power Station* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.  
姚顺春. 激光诱导击穿光谱技术在电站运行诊断中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- 18 Li Junyan, Lu Jidong, Li Jun, *et al.*. Laser-induced plasma spectra of heating surface materials with different hardnesses [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 08185002.  
李俊彦, 陆继东, 李军, 等. 不同硬度受热面材料的激光诱导等离子体光谱特性分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 08185002.
- 19 Li Xuefeng, Wang Chunfen, Wang Jiamin. Discrimination of tempered martensite from tempered sorbite [J]. *Heat Treatment*, 2012, 27(4): 12–16.  
李雪峰, 王春芬, 王嘉敏. 回火马氏体与回火索氏体辨析[J]. *热处理*, 2012, 27(4): 12–16.
- 20 A Kramidea, Ralchenko Yu, J Reader, *et al.*. NIST Atomic Spectra Database (Version 5.0) [DB/OL]. [2014-01-22] <http://physics.nist.gov/asd>.
- 21 Ümit Aydin, Peter Roth, Christoph Dominic Gehlen, *et al.*. Spectral line selection for time-resolved investigations of laser-induced plasmas by an iterative Boltzmann plot method [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2008, 63(10): 1060–1065.
- 22 P M Lemieux, J V Ryan, N B French, *et al.*. Results of the september 1997 DOE/EPA demonstration of multimetal continuous emission monitoring technologies [J]. *Waste Management*, 1998, 18(6-8): 385–391.
- 23 P Stavropoulos, A Michalakou, G Skevis, *et al.*. Laser-induced breakdown spectroscopy as analytical tool for equivalence ratio measurement in methane-air premixed flames [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2005, 60(7-8): 1092–1097.
- 24 P W J M Boumans. *Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1987.

栏目编辑: 史敏