

基于激光烧蚀吸收光谱的合金钢中铝元素的定量分析

叶浩^{1,2,3}, 张骏昕^{1,2,3}, 梅海平^{1,3}, 黄尧^{1,3}, 袁子豪^{1,2,3}, 曹振松^{1,3*}, 黄印博^{1,3}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

³先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 将激光烧蚀与吸收光谱技术结合, 搭建一套激光烧蚀吸收光谱实验测量装置。将合金钢作为待测样品, 选择铝原子的基态跃迁(394.40 nm)作为分析谱线, 开展合金钢中铝元素的定量检测与分析实验。实验结果表明, 在激光脉冲能量为 30 mJ、探测高度为 2 mm 及采样延迟时间为 8 μ s 的实验条件下, 较为适宜对合金钢中不同含量铝元素进行定量检测与分析。在优化的实验条件下, 获得合金钢标准样品中铝原子的高分辨率和灵敏度吸收光谱信号, 并建立铝含量与吸收强度的定标曲线。定标曲线的拟合相关参数优于 0.999, 检测限为 0.066%。研究结果证明激光烧蚀吸收光谱技术在合金钢中铝元素定量分析方面的可行性, 以及在合金钢及其他材料中痕量元素和同位素定量分析方面具有巨大潜力。

关键词 激光光学; 激光烧蚀; 等离子体; 原子吸收光谱; 铝元素; 定量分析

中图分类号 O433.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1011004

Quantitative Analysis of Aluminum in Alloy Steel by Laser Ablation Absorption Spectroscopy

Ye Hao^{1,2,3}, Zhang Junxin^{1,2,3}, Mei Haiping^{1,3}, Huang Yao^{1,3},
Yuan Zihao^{1,2,3}, Cao Zhensong^{1,3*}, Huang Yinbo^{1,3}

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China,
Hefei, Anhui 230026, China;

³Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract A set of experimental measuring devices is developed by combining the laser ablation technique with absorption spectroscopy to obtain laser ablation absorption spectra. Alloy steel is used as the test sample, and the ground state transition (394.40 nm) of the aluminum atoms is selected as the analytical spectral line for the quantitative detection and analysis experiment of aluminum in the alloy steel samples. The experimental results reveal that the most suitable experimental conditions for the successful detection and analysis of aluminum include a laser pulse energy of 30 mJ, a detection height of 2 mm, and a sampling delay time of 8 μ s. Under these optimized conditions, the high-resolution and high-sensitivity absorption spectrum signals of the aluminum atoms in the alloy steel standard samples are obtained, while the calibration curve of the aluminum content and absorption intensity are also determined. Moreover, the fitting parameters of the calibration curve are higher than 0.999, and the limit of detection is 0.066%. Thus, laser ablation absorption spectroscopy proves to be effective for the quantitative analysis of aluminum in alloy steel, while the results also indicate its great potential for the quantitative analysis of trace elements and isotopes in alloy steel and other materials.

Key words laser optics; laser ablation; plasma; atomic absorption spectroscopy; aluminum; quantitative analysis

OCIS codes 140.3440; 280.5395; 300.1030; 300.6210

收稿日期: 2020-03-30; 修回日期: 2020-04-26; 录用日期: 2020-06-04

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA17010104)、中国科学院青年创新促进会项目(2015264)

* E-mail: zscao@aiofm.ac.cn

1 引 言

激光烧蚀(LA)是指使用具有一定能量的脉冲激光束照射样品,随着激光能量的沉积,样品表面的局部区域急剧升温,从而出现熔融、汽化、粒子喷射、等离子体产生、等离子体加热和膨胀等过程,使得样品表面发生质量迁移的现象^[1-3]。LA过程会在固体样品材料的表面上产生瞬态等离子体,为固体材料的光谱分析提供了很好的基础。一般而言,几乎所有的样品都可以经过烧蚀处理,然后使用发射或吸收光谱的方法对激光诱导产生的等离子体中的原子、离子和分子进行光学检测分析,在此基础上可获取样品中所含元素的相关信息。目前,基于LA方法应用较为广泛的技术有激光诱导击穿光谱(LIBS)^[4-8]和LA吸收光谱(LAAS)。

LAAS技术是LA技术与半导体激光吸收光谱(DLAS)相结合而发展起来的一种新型光谱分析技术,具有分析速度快、样品预处理简单、操作便捷、光谱分辨率高和探测灵敏度高等优点,为此逐渐受到研究人员的重视。与LIBS技术相比,LAAS技术一般在等离子体的冷却阶段测量信号,此时由于等离子体内电子数的电子密度和温度的降低,多普勒加宽和斯塔克加宽都会相应减小,因而吸收光谱会有较高的光谱分辨率,且背景噪声较小,信噪比较高。LIBS技术受到光谱仪分辨能力的限制,导致分辨率相对较低,谱线的选择也会受到限制。目前,LAAS技术主要应用于固体材料中的同位素分析^[9-10]。Quentmeier等^[9]采用了LA单光束二极管激光吸收光谱法测量固体样品中²³⁵U/²³⁸U同位素比值,测量的精密度和准确度均约为10%。Liu等^[10]在Quentmeier等^[9]工作的基础上,以两个激光二极管作为光源,采用LA-双光束二极管激光原子吸收光谱法测量²³⁵U/²³⁸U同位素比值,测量的精密度和准确度分别为5%和2%,比单光束检测法有很大改善。Miyabe等^[11]以一个可调谐外腔半导体激光器作为光源,采用了LAAS技术测量²³⁵U/²³⁸U同位素比值,相对标准误差为2.5%。Taylor等^[12]将LA与双光束差分吸收法结合,减少了非共振吸收的关联噪声,在标准压力的空气环境下获得了²³⁸U的吸收光谱。上述研究多注重固体材料中的同位素分析,目前用于元素定量分析的研究还较为有限^[13]。LIBS技术可以用于合金钢及其他样品中痕量元素的探测和分析,但其灵敏度和精确度还无法满足某些实际的应用需求,则本文采用探测灵敏度更高的

LAAS技术对痕量元素的定量分析进行探索。

钢材中各元素的成分含量对其质量和性能都有重要影响。实际生产应用中,需要根据不同的用途向钢材内加入不同的合金元素,如加入锰可以提高钢的淬透性,加入钛能够改善钢的热强性,加入铝能够起到抗氧化的作用等。不同型号钢材的成分含量有所不同,对其进行分析检测是确保钢材质量和性能合格的重要环节。本文选择合金钢作为烧蚀样品,并对合金钢标样中的铝元素进行定量检测与分析,为后期将LAAS技术应用于固体材料中痕量元素的高灵敏度的定量检测与分析奠定基础。

2 测量原理与实验装置

2.1 LAAS技术测量原理

LAAS技术的测量原理如图1所示。从图1可以看到,探测光平行于样品表面,穿过由脉冲LA产生的等离子体后被光电探测器所接收。样品内所含信息可通过监测等离子体传输的光强变化来获得。Lambert-Beer定律提供透射光强度与初始光强度之间的关系^[14],表达式为

$$I(t) = I_0 \exp[-A_b(\lambda, t)], \quad (1)$$

式中: $I(t)$ 为在时间 t 时入射至探测器上的探测光强度; I_0 为在没有吸收的情况下的初始探测光强度; $A_b(\lambda, t)$ 为在 t 时波长 λ 的吸收强度。(1)式还可表述为

$$A_b(\lambda, t) = -\ln[I(t)/I_0]. \quad (2)$$

$A_b(\lambda, t)$ 为吸收截面 σ 、穿过样品表面等离子体的路径长度 L 和原子数密度 N 的乘积。 N 是沿着视线位置 x 和测量时间 t 的函数,则吸收强度可表示为

$$A_b(\lambda, t) = \sigma(\lambda, t)N(x, t)L. \quad (3)$$

当实验测量时,可利用(3)式将测量得到的 $I(t)$ 和 I_0 转化为 $A_b(\lambda, t)$,并定量获得某种元素在样品中的含量。由于 L 和 σ 难以精确给出,故在对待测样品的含量进行测量时,一般利用标准样品对其进行标定,标定方法将在第3节给出更详细的介绍。

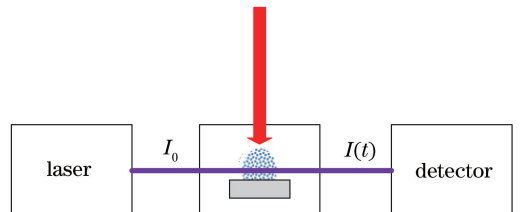


图1 LAAS技术的测量原理示意图

Fig. 1 Schematic of LAAS technique measurement principle

2.2 实验装置

图 2 为 LAAS 实验装置简图,其中 DAQ card 为数据采集卡,PC 为个人计算机。实验中,将调 Q 的 Nd:YAG 脉冲激光器作为烧蚀光源,使用其对合金钢标准样品进行烧蚀处理。该激光器输出的激光(波长为 1064 nm,脉宽为 8 ns,重复频率为 1~20 Hz,单脉冲能量最大为 200 mJ,能量稳定性 $\leq 1\%$)经聚焦透镜(焦距 $f=150$ mm)进入密闭样品池后垂直入射到样品上,在其表面附近产生等离子体。样品表面上激光光斑的直径约为 500 μm 。聚焦透镜安装在一个纵向位置可精密调节的一维平

移台上,调整透镜位置使得激光束的焦点在样品表面下方 1 mm 处。样品池安装在一个三轴精密电动位移平台上,测量时通过移动位移台使得每个激光脉冲烧蚀样品的不同位置,避免因多次烧蚀产生烧蚀坑,保证在相同的实验条件下进行实验测量。为了保证烧蚀激光聚焦的位置不变,同时实现探测光到样品表面距离的调整,则需要同时对聚焦透镜和样品的位置进行调整。实验前需对样品表面进行机械抛光,然后使用丙酮溶液对样品表面进行处理。实验时,样品池内由机械泵抽至真空,并可充入相应的缓冲气体,气体压力在 $10\sim 10^5$ Pa 范围内变化。

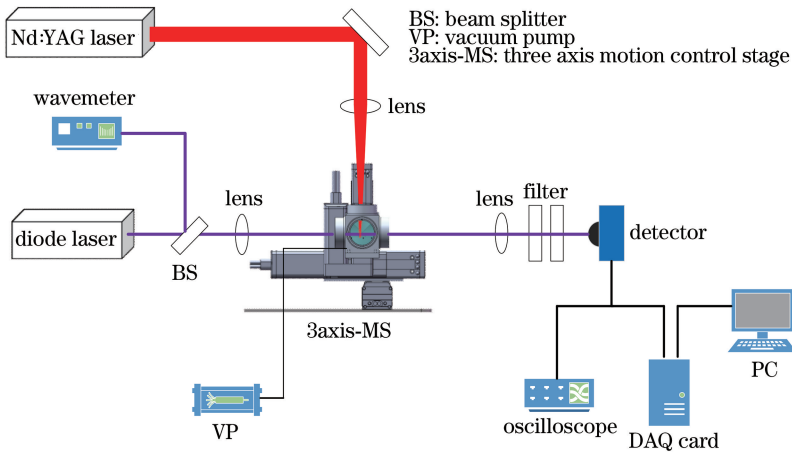


图 2 LAAS 实验装置简图

Fig. 2 Schematic of LAAS experimental apparatus

探测光源为 DL-pro 型的可调谐半导体外腔激光器,输出波长由 WS6-200 型的波长计来监测。探测光经过透镜聚焦至烧蚀激光产生等离子体区域的中心,并平行于样品表面穿过等离子体区域。探测光穿过等离子体区域后,经过透镜聚焦至光电探测器(探测带宽为 150 MHz)上。光电探测器的输出信号一路送至示波器以实时监测,另一路送至数据采集卡后再送至计算机进行数据的采集和处理。采集卡和示波器的触发信号来自烧蚀激光器中调 Q 开关同步输出的脉冲信号。为了减少等离子体自身辐射和烧蚀激光散射等背景噪声的影响,光电探测器放置在距离密闭样品池约为 50 cm 处,并在探测器前放置两个滤光片。其中滤光片 1 为 Semrock 滤光片, $\lambda=395$ nm,滤光片带宽为 11 nm,滤光片 2 为 Thorlabs 滤光片, $\lambda=1064$ nm。

半导体激光器的波长可通过手动调节激光器内部光栅的位置进行粗调,细调则可通过调节与光栅关联的压电传感器来完成。测量时,当探测光的波长调谐至铝原子的共振波长($\lambda=394.40$ nm)时,探

测光的透过率开始减小。探测光的波长在铝原子共振波长的附近不断扫描,并记录每个烧蚀脉冲中时间分辨探测光的透过率,经过多次独立测量后,便可以获得铝原子的时间分辨吸收光谱。

测量实验中,使用的 7 个样品为合金钢标准样品,样品如图 3 所示。采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MASS)对样品进行检测,其中铝含量分别为 0.11%、0.46%、1.01%、4.56%、11.01%、81.65% 和 90.18%。



图 3 合金钢标准样品

Fig. 3 Alloy steel standard sample

3 结果与讨论

激光诱导产生等离子体及其随后的等离子体演化所涉及的物理学过程非常复杂,包含许多同时进行的过程,包括样品加热、熔融、汽化、粒子喷射、等离子体产生、等离子体加热和膨胀等。整个过程可分为等离子体产生、激光-等离子体的相互作用和等离子体羽膨胀三个阶段,这些阶段均会受到样品材料特性(物理和化学)、激光参数(波长,脉冲宽度,脉冲能量等)以及环境条件(环境气体的性质和压力以及磁场等)的影响。实验测量过程中,参数调整空间相对较大,实验条件的选择对装置性能影响较大,这需要对实验测量的条件进行优化。通过适当调整产生等离子体的物理条件以及光谱测量参数,可获得适合元素定量分析的优化实验条件。

3.1 分析谱线(铝原子吸收线)的确定

选择两个不同的探测光波长进行比对,其一为远离铝原子的吸收线(offline),其二为处在铝原子的吸收线(online,波长为 394.40 nm),测量结果如图 4 所示。从图 4 可以看到,测量起始阶段,曲线出现一些波动,这是等离子体自身辐射经过滤光片后的残余辐射造成的。由两组信号对比可知,当探测光波长调谐至远离铝原子吸收线时,从谱线上不能看到明显的吸收线,当波长调谐至铝原子吸收线时,吸收接近 60%。即在不同的探测光波长下,吸收率存在明显差异,由此可以判定在 394.40 nm 处确实存在气态铝原子的吸收线,这与在原子光谱数据库中的所查结果一致^[15]。

3.2 实验条件的优化

3.2.1 烧蚀激光能量

通常影响烧蚀等离子体中铝原子浓度的因素主要有烧蚀激光能量和烧蚀环境(样品池内压力和缓

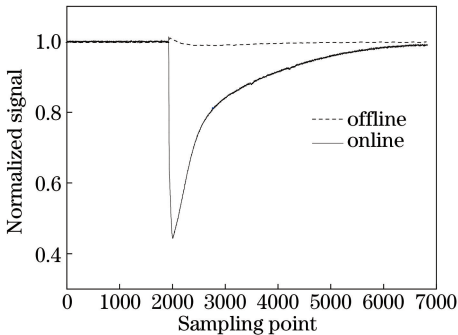


图 4 不同探测光波长的吸收率测量

Fig. 4 Absorbance measurement of different probe light wavelengths

冲气体种类)等。当入射激光的功率密度超过样品的烧蚀阈值时,样品才能激发出等离子体,超过阈值后,能量越高,激发出的等离子体中待测原子数越多。然而,能量过高会在样品表面激发出小碎片,造成吸收信号的大幅度波动,从而影响测量信号的稳定性。为了得到最佳的烧蚀激光能量,首先对铝含量为 11.01% 的合金标准样品开展不同烧蚀激光能量下等离子体透过率的测量实验,激光能量与等离子体透过率的关系曲线如图 5 所示。从图 5 可以看到,在一定的能量范围内,随着烧蚀激光能量的增加,产生的铝原子数逐渐增多,吸收深度逐渐加深;随着烧蚀激光能量的继续增加,吸收深度会趋近饱和,且吸收曲线开始变得不规律。为了避免吸收饱和,同时具有足够的吸收深度,需要选择适中的 LA 脉冲能量,发现烧蚀激光能量在 25~35 mJ 范围内效果较好。考虑到不同铝含量样品的烧蚀环境,实验选择 30 mJ 作为适宜的烧蚀激光能量。

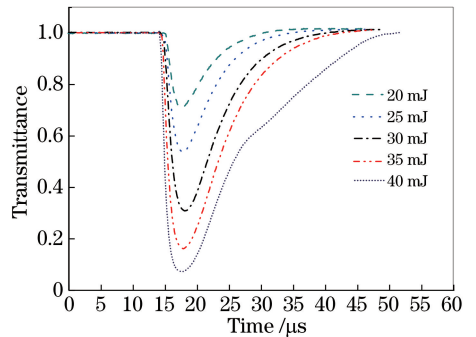


图 5 不同烧蚀激光能量下的等离子体透过率
Fig. 5 Plasma transmittance under different ablation laser energy

3.2.2 信号采集延迟时间

当脉冲激光与样品相互作用时,在样品表面上会产生瞬态等离子体,等离子体的存在时间约在数微秒到数十微秒之间,这与周围的环境及烧蚀激光的参数等有关,因此选择合适的数据采集时间对于获取较好的吸收信号十分重要。为了得到最佳的采样延时,在烧蚀激光能量为 30 mJ 的条件下,对铝含量为 11.01% 的合金标样进行不同采样延时的吸收光谱对比分析,结果如图 6 所示。从图 6 可以看到,随着采样延迟时间的增加,吸收信号处于一直变小的趋势,在采样延迟时间为 8 μs 附近信号出现起伏。由于在烧蚀开始阶段,等离子体内电子数密度和温度较高,多普勒加宽和斯塔克加宽效应严重,吸收谱线过宽。烧蚀早期,样品会产生大量微粒,导致测量的信号噪声和波动较大,结果如图 7 所示。因

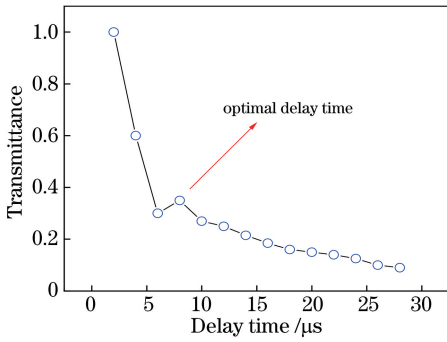


图 6 不同采样延迟时间铝原子的吸收信号

Fig. 6 Absorption signals of aluminum atoms at different sampling delay time

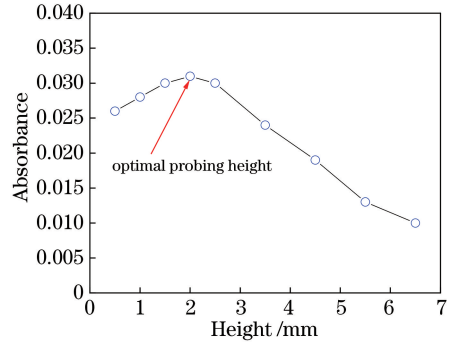


图 8 不同探测高度下的铝原子吸收信号

Fig. 8 Absorption signals of aluminum atoms under different detection heights

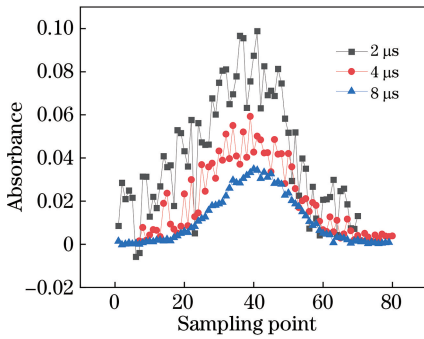


图 7 不同采样延时的吸收光谱

Fig. 7 Absorption spectra at different sampling delay time

3.3 不同铝含量样品的吸收光谱分析

基于 3.2 节的优化实验条件,测量 7 种铝含量 (0.11%、0.46%、1.01%、4.56%、11.01%、81.65% 和 90.18%) 合金钢标准样品的铝原子吸收光谱。图 9 为其中 4 种样品的原始吸收光谱。探测光波长在铝原子吸收线 (394.40 nm) 附近来回扫描,每次完整的扫描过程均会经过铝原子吸收峰两次,导致吸收谱线出现两个独立的吸收峰,这也从侧面反映探测光在测量过程中的波长扫描稳定性和重复性良好。测量的吸收峰在不同的位置处出现些许波动,这主要是由样品池内环境(缓冲气体、压力)、烧蚀激光脉冲能量的起伏及样品的不均匀性等因素造成的。

对于每个标准样品均进行 30 次独立的铝原子吸收峰测量,并对测量结果进行线性拟合处理,建立铝含量与吸收强度的定标曲线,结果如图 10 所示。从图 10 可以看到,铝含量和吸收强度具有很好的线性度,拟合相关系数可达 0.999。与 LIBS 技术相比,LAAS 技术获得的定标曲线不需要复杂的定标方法,相对而言数据处理较为简单。

检测限 (LOD) 是衡量测量装置检测能力的一个重要指标,可用

$$L_{LOD} = 3a/k \quad (4)$$

来分析计算铝原子 (394.40 nm) 吸收谱线的检测限^[16]。式中: a 为吸收谱线背景强度的标准偏差; k 为基于 $3a$ 的吸收强度与浓度的转换系数。

等离子体演变过程中,吸收光谱存在多种线性加宽机制,包括多普勒加宽、斯塔克加宽和压力加宽,实验中使用 Voigt 函数对吸收光谱进行拟合较为合适。对铝含量为 1.01% 的标准样品的吸收光谱信号进行 Voigt 拟合分析,结果如图 11 所示。从图 11 可以看到,拟合后的吸收峰峰值为 0.0030,则

此,等离子体演变早期不适合作为数据采集点,当延迟时间较长时,吸收信号的强度较低。经过多次采样对比分析后,综合考虑信号的稳定性与信号强度这两个因素,实验选用 8 μs 作为最佳采样延时。

3.2.3 探测高度

探测高度是指平行于样品表面穿过等离子体的探测光到样品表面的垂直距离。当一束高能量激光脉冲入射到样品表面后激发出等离子体时,等离子体迅速向外膨胀,逐渐扩散并远离样品表面。当探测光从等离子体不同的高度位置穿过时,透过率明显不同,这会造成吸收光谱存在较大差异,因此需要寻找一个最适合吸收信号采集的探测高度。在不同的探测高度下,对铝含量为 11.01% 的合金钢标样进行吸收光谱信号的测量,结果如图 8 所示。从图 8 可以看到,随着探测高度的增加,吸收信号先变大,后逐渐变小,即存在一个最佳的探测高度,而 2 mm 是理想的探测高度。

基于上述的测量结果与分析,考虑到 7 种不同铝含量合金钢标准样品的测量条件,实验选取的优化条件:烧蚀激光能量为 30 mJ、采样延迟时间为 8 μs、探测高度为 2 mm。

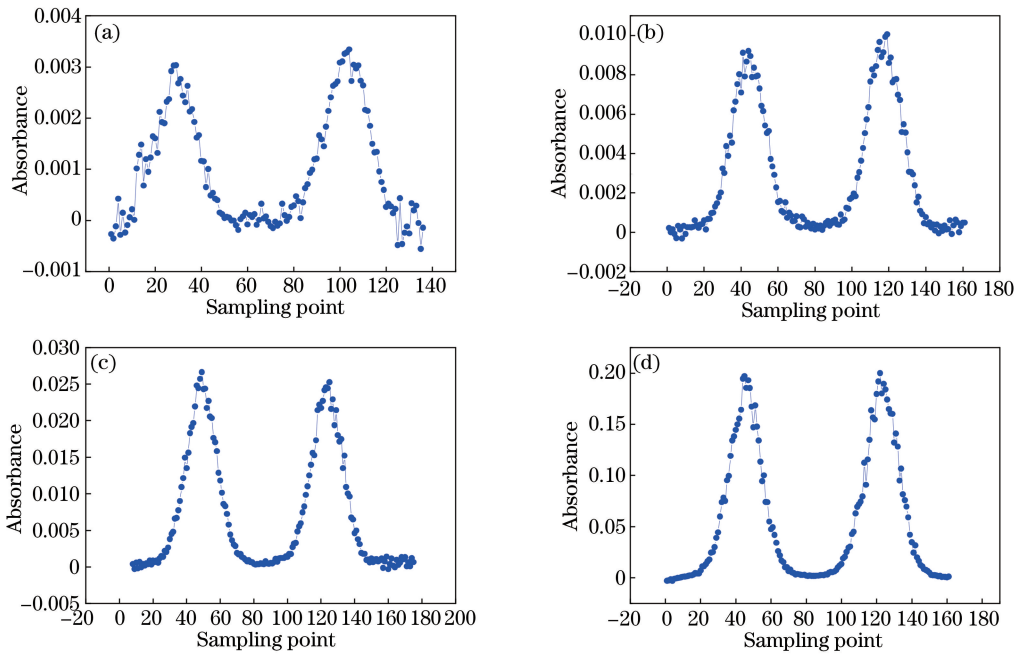


图 9 不同含量的铝样品的时间分辨吸收光谱。(a) 1.01%;(b) 4.56%;(c) 11.01%;(d) 90.18%

Fig. 9 Time-resolved absorption spectra of aluminum samples with different contents.

(a) 1.01%; (b) 4.56%; (c) 11.01%; (d) 90.18%

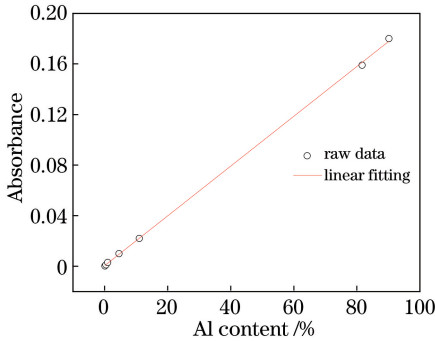


图 10 铝含量与铝原子吸收强度的线性度分析

Fig. 10 Linearity analysis of aluminum content and

aluminum atomic absorption intensity

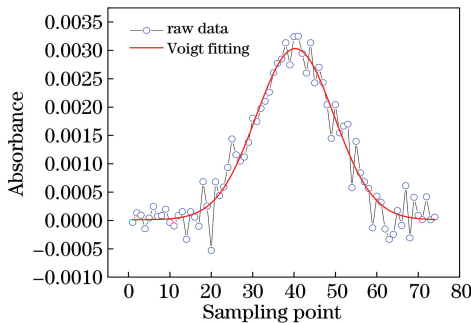


图 11 1.01% 铝样品吸收光谱与拟合光谱

Fig. 11 1.01% aluminum sample absorption spectrum and fitting spectrum

k 可计算为 $0.0030/1.01\%$ 。对原始吸收光谱吸收峰两端的信号进行分析,获得背景强度的 a 为

6.6×10^{-5} 。因此,由(4)式可知铝原子含量的检测限为 0.066% 。实验结果表明,基于 LAAS 技术建立的测量装置适用于合金钢标样中铝含量的定量检测与分析。

4 结 论

利用具有一定能量的激光脉冲烧蚀样品产生等离子体的方式作为固体样品的直接原子化手段,结合可调谐激光吸收光谱技术,搭建一套 LAAS 实验测量装置。利用该测量装置,对合金钢标准样品中的铝元素进行定量检测与分析研究。通过不断调整相关参数,得到的优化实验条件:激光脉冲能量为 30 mJ 、探测高度为 2 mm 、采样延迟时间为 $8 \mu\text{s}$ 。在此基础上开展系统的测量实验,获得不同的铝含量合金钢标准样品中铝原子的高分辨率和灵敏度吸收光谱信号,并建立铝含量与吸收强度的定标曲线。铝含量与吸收强度线性度优于 0.999 ,探测灵敏度较高,检测限为 0.066% 。这些实验结果表明,LAAS 技术适用于合金钢标样中铝元素的定量分析,并对固体材料中痕量元素的定量检测与分析有很大的应用潜力。后续将进一步改进测量装置,优化实验条件,如在样品池内注入缓冲气体,并优化样品池内的压力,以提高探测的精确度和灵敏度,便于开展其他金属元素及同位素的定量分析。

参 考 文 献

- [1] Russo R E. Laser ablation [J]. *Applied Spectroscopy*, 1995, 49(9): 14-28.
- [2] Chichkov B N, Momma C, Nolte S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. *Applied Physics A*, 1996, 63(2): 109-115.
- [3] Russo R E, Mao X L, Liu H C, et al. Laser ablation in analytical chemistry: a review[J]. *Talanta*, 2002, 57(3): 425-451.
- [4] Miziolek A W, Palleschi V, Schechter I. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [5] Yu Y, Zhao N J, Meng D S, et al. Detection of heavy metals in soil based on polarization resolved LIBS technique[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0811001.
余洋, 赵南京, 孟德硕, 等. 基于偏振分辨 LIBS 技术的土壤重金属检测研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0811001.
- [6] Xu X J, Wang X S, Li A Z, et al. Fast classification of tea varieties based on laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0311003.
徐向君, 王宪双, 李昂泽, 等. 基于激光诱导击穿光谱的茶叶品种快速分类[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0311003.
- [7] Liu S M, Xiu J S, Liu Y Y. Rapid quantitative analysis of element content ratios in Cu(In, Ga)Se₂ thin films using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0911001.
刘世明, 修俊山, 刘云燕. 基于激光诱导击穿光谱技术的铜铟镓硒薄膜中元素含量比的快速定量分析方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0911001.
- [8] Li W P, Zhou W D. Comparative study of underwater single pulse and orthogonal double pulse laser-induced breakdown spectroscopy of barium element in solution[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0911003.
李文平, 周卫东. 溶液中 Ba 元素的水下单脉冲与正交双脉冲 LIBS 的比较研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0911003.
- [9] Quentmeier A, Bolshov M, Niemax K. Measurement of uranium isotope ratios in solid samples using laser ablation and diode laser-atomic absorption spectrometry[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2001, 56(1): 45-55.
- [10] Liu H, Quentmeier A, Niemax K. Diode laser absorption measurement of uranium isotope ratios in solid samples using laser ablation[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2002, 57(10): 1611-1623.
- [11] Miyabe M, Oba M, Iimura H, et al. Absorption spectroscopy of uranium plasma for remote isotope analysis of next-generation nuclear fuel[J]. *Applied Physics A*, 2013, 112(1): 87-92.
- [12] Taylor N R, Phillips M C. Differential laser absorption spectroscopy of uranium in an atmospheric pressure laser-induced plasma [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 594-597.
- [13] Phillips M C, Harilal S S, Yeak J. Tunable laser absorption spectroscopy of uranium in femtosecond laser ablation plasmas [C] // CLEO: Science and Innovations 2016, June 5-10, 2016, San Jose, California, United States. Washington, DC: OSA, 2016: STh1H.7.
- [14] Harilal S S, Brumfield B E, Lahaye N L, et al. Optical spectroscopy of laser-produced plasmas for standoff isotopic analysis [J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5(2): 021301.
- [15] Kramida Y, Ralchenko J, Reader N A. NIST atomic spectra database version 5.7 [DB/OL]. (2019-10-01) [2020-03-29]. <http://physics.nist.gov/asd>.
- [16] Miyabe M, Oba M, Jung K, et al. Laser ablation absorption spectroscopy for isotopic analysis of plutonium: spectroscopic properties and analytical performance [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2017, 134: 42-51.