

脉冲 Nd:YAG 激光烧蚀石墨的反应性 光声谱研究

沈瑞琪* 叶迎华 戴实之

(南京理工大学化工学院 南京 210094)

提要 应用脉冲宽度为 400 μs 的自由振荡 Nd:YAG 激光器对石墨进行烧蚀并且检测烧蚀的反应性声谱。烧蚀声谱存在典型的双峰结构并且该声谱与光声腔长度无明显关系。烧蚀程度越大,与烧蚀相关的烧蚀声峰衰减越强烈,烧蚀声峰的上升时间约为 400 μs 。当光斑直径为 1.10 mm 时,激光能量从 320 mJ 下降到 150 mJ,烧蚀声峰下降时间从 3 ms 上升到 8 ms,石墨的烧蚀光能约为 65 mJ。烧蚀声峰值与光能量成正比。EMS 分析烧蚀斑表明石墨的气化导致了烧蚀声谱的双峰结构和在烧蚀孔的内表面上有与光束正交的波纹状表面。

关键词 激光烧蚀,反应性光声谱,光声检测,EMS 分析,石墨

在研究激光对含能材料的点火过程中发现了反应性光声谱的双峰结构并且证实了这种双峰结构与含能材料的热化学过程和二次燃烧现象相关^[1,2],但是非含能材料在光烧蚀或者有物质抛散时也可以出现这种结构。双峰的真正含义还不完全清楚。在激光点火过程中,反应性声波中包括了光声波、化学反应声波和烧蚀声波,我们有必要深入研究烧蚀声波的特征以便从反应性声波中分离出化学反应声波。光声光热技术可以有效地应用于对激光烧蚀的研究。常用的技术是光热光偏转技术^[3]和光声技术^[4],其中光声技术对测试系统的要求比较低而且可以检测强的烧蚀过程的声波。目前应用光声光热技术主要研究生物组织和薄膜的光烧蚀。本文将采用间接光声技术和电子显微技术研究烧蚀光声谱的特征。

1 光声检测

在光声检测系统中采用脉冲宽度为 400 μs 的自由振荡 Nd:YAG 激光器对光声池内的石墨片进行烧蚀并且使用宽频响应的 PZT 声传感器检测烧蚀的反应性声谱。光声池的原理结构如图 1 所示,光声池的直径为 10 mm,长度可调。传感器轴线距样品表面距离为 5 mm。声信号通过 PZT 传感器转换和电荷放大器放大后由数据采集和分析系统记录和分析。

激光对石墨进行烧蚀的反应性光声谱分别由图 2 和图 3 描述,其中图 2 描述了激光与石墨相互作用的完整的声谱,图 3 描述了光声波的波阵面。激光对石墨的烧蚀作用可以从光斑处留下的烧蚀斑观测到。对烧蚀斑进行电子显微分析,不同光能作用下烧蚀斑的结构特点分别

* 南京大学声学所访问学者。

由图 4 和图 5 描述。

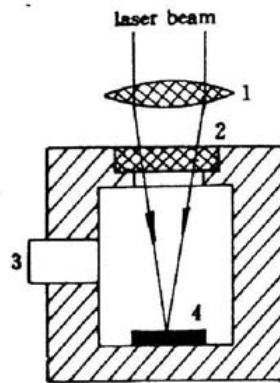


图 1 光声腔结构图

- 1: 聚焦透镜; 2: 玻璃透窗;
- 3: PZT 声传感器; 4: 样品

Fig. 1 Diagram of the photoacoustic cell

- 1: focus lens; 2: glass window;
- 3: PZT microphone; 4: sample

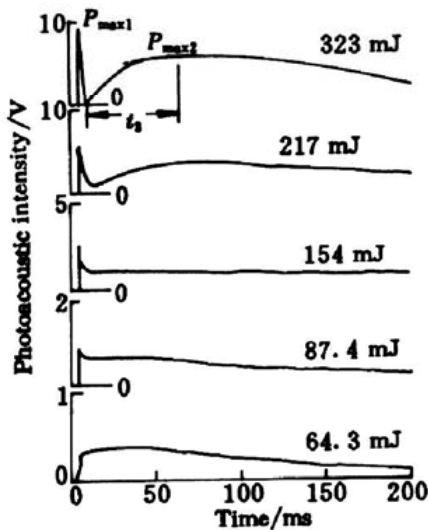


图 2 不同激光能量作用下石墨的反应性光声谱
 Fig. 2 Reactivity photoacoustic spectra of graphite at different laser energies

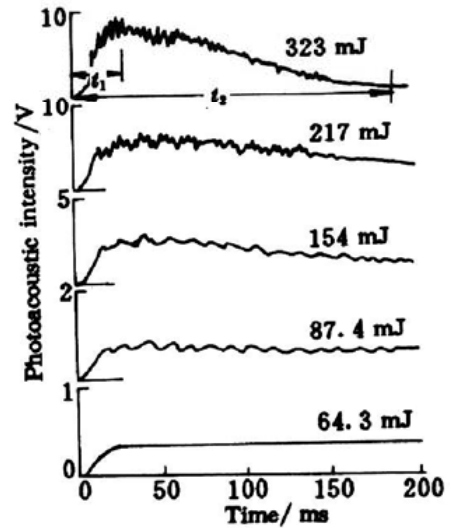


图 3 石墨的反应性光声谱的前波波形
 Fig. 3 The front wave of reactivity photoacoustic spectra of graphite

2 实验结果分析

当激光作用光斑为 1.10 mm, 激光作用能量低于 64 mJ 时, 激光束不对石墨烧蚀, 但是当能量大于 65 mJ 时在石墨片的表面有烧蚀斑。图 4 是激光能量为 66.5 mJ 时的烧蚀斑结构。图 5 则是激光能量为 340 mJ 时的烧蚀斑和烧蚀孔内表面。内表面呈波纹状并且纹路与光路正交。显微图片也表明了强激光和弱激光对石墨烧蚀的程度不同。弱激光对石墨烧蚀以石墨的剥离为主, 烧蚀表面粗糙。强激光对石墨烧蚀以气化为为主, 表面光滑。光声谱清楚地反映了烧蚀的过程。烧蚀光声波有一个迅速衰减的前峰并且将烧蚀声波分成一个短脉宽声峰(或烧蚀声峰)和一个长脉宽声峰, 即烧蚀光声谱具有双峰结构特点, 而且在烧蚀声峰上叠加了高频声波。人们普遍认为激光对固体烧蚀时将经历气化和等离子体化的过程, 并且伴随形成冲击波^[5]。前峰的迅速衰减是由于冲击波后的稀疏波引起并且在很大程度上与烧蚀程度和烧蚀孔有关。当烧蚀不存在时, 光声波中不存在迅速衰减的前峰, 而且光声波的波阵面光滑, 这种情况已经通过数值模拟得到证实^[6]。

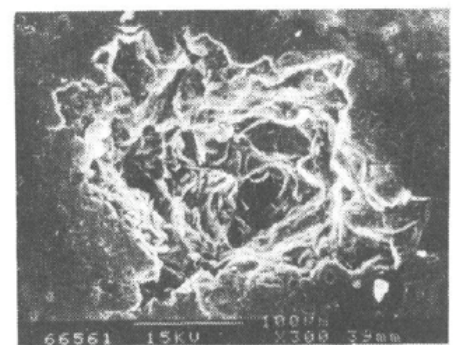


图 4 66.5 mJ 激光作用形成的石墨烧蚀斑(300×)

Fig. 4 An ablation spot of graphite formed at 66.5 mJ laser energy (300×)

Nd:YAG 激光与石墨相互作用形成的反应性光声波前峰上升时间与激光的脉冲宽度相当,约为 400 μ s。激光能量从 320 mJ 下降到 150 mJ,烧蚀声峰下降时间从 3 ms 上升到 8 ms。

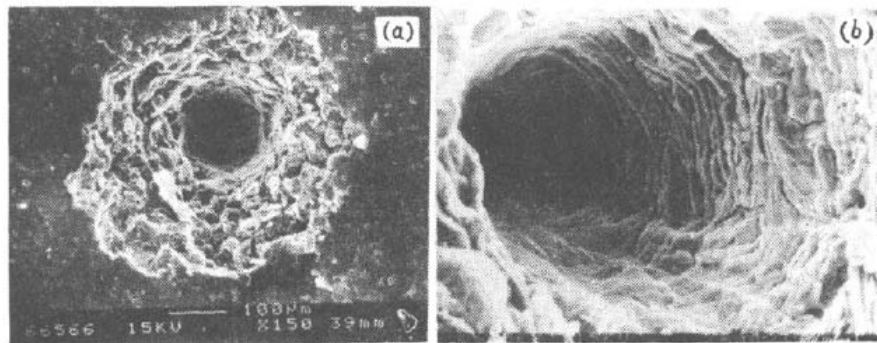


图 5 340 mJ 激光作用形成的石墨烧蚀斑
(a) 烧蚀斑结构(150 \times);(b) 烧蚀孔表面结构(600 \times)

Fig. 5 An ablation spot of graphite formed at 340 mJ laser energy

(a) ablated spot structure (150 \times); (b) surface structure of the ablated hole (600 \times)

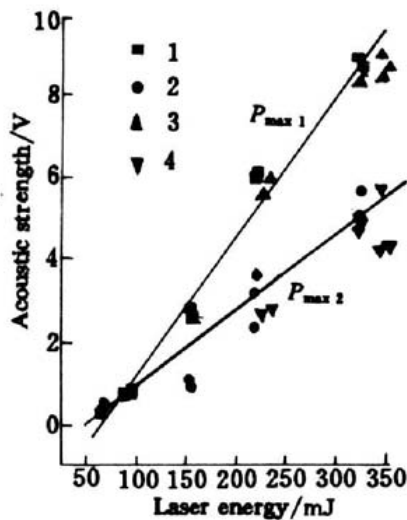


图 6 烧蚀声谱中双峰峰值的关系

P_{max1} : 第二声峰值; P_{max2} : 烧蚀声峰值;

1, 2: 10 mm 光声腔长; 3, 4: 22 mm 光声腔长

Fig. 6 Realation of peak values for two wave crests in ablation sound spectrums

P_{max1} : the second sound crest; P_{max2} : ablation sound crest;

1, 2: 10 mm cell length, and 3, 4: 22 mm cell length

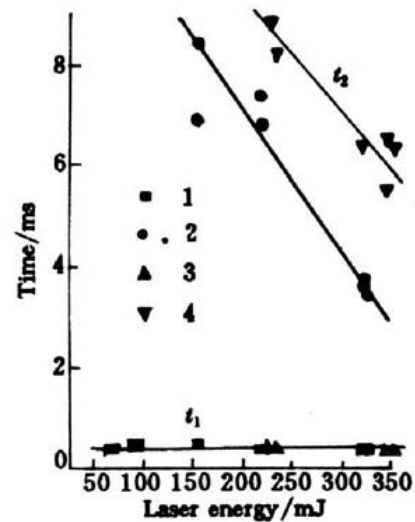


图 7 烧蚀声峰的上升时间 (t_1) 和脉冲宽度 (t_2)

1, 2: 10 mm 光声腔长; 3, 4: 22 mm 光声腔长

Fig. 7 Rising time (t_1) and pulse width (t_2) of ablation sound crest

1, 2: 10 mm cell length; 3, 4: 22 mm cell length

表 1 激光与石墨相互作用的光声谱平均参数值

Table 1 Average values of parameters of the acoustic spectrum in the interaction of laser and graphite, at 10 mm PA cell length and 1.10 mm light spot

laser energy/mJ	t_1 / μ s	t_2 / μ s	t_3 / μ s	P_{max1} /V	P_{max2} /V
322	405	3678	40200	8.96	5.23
218	400	7008	51473	6.05	3.04
154	400	7662	none	2.68	0.98
89.4	415	none	none	0.827	0.693
65.6	400	none	none	0.355	0.488

激光烧蚀声谱中的双峰峰值与激光作用能量呈正比,并且当双峰峰值重合时激光作用能量达到光烧蚀的阈值,见图 6。改变光声腔的长度对激光烧蚀声谱的影响不大。如图 6 和图 7 所示,当光声腔的长度从 10 mm 增加到 22 mm 时,双峰峰值和烧蚀峰上升时间基本不变,烧蚀峰的衰减时间增加约为 2 ms,但是衰减规律不变。

根据以上实验得到的结果我们可以得出以下结论。激光对石墨烧蚀形成的反应性声谱具有双峰结构特点,这种双峰结构只有在石墨被烧蚀时才会出现。前峰是与烧蚀过程相关的声波。整个声谱的深层含义还不清楚。双峰的峰值都与激光作用能量成正比。当双峰值相等时,也就是双峰合为单峰时,激光烧蚀达到临界点。光声波前沿的上升时间与光脉宽相当而且前峰衰减时间随激光作用能量的增加而减少。当聚焦光点的直径为 1.10 mm 时,根据作用点处的显微分析表明在 65 mJ 左右石墨开始烧蚀。弱激光对石墨烧蚀以石墨的剥离为主,强激光对石墨烧蚀以气化为生。

参 考 文 献

- 1 Shen Ruiqi, Ye Yinghua, Dai Shizhi. Secondary combustion phenomenon of solid propellant ignited by laser. *Applied Laser* (应用激光), 1995, 15(5): 207 (in Chinese)
- 2 Sun Tongju, Shen Ruiqi, Ye Yinghua. The phenomenon of two-stage initiations in laser ignition pyrotechnics. *Acta Armamentarii* (the fascicule of explosives and propellants)(兵工学报-火化工分册), 1996, 18(1): 12~14 (in Chinese)
- 3 E. Welsch, K. Ettrich, M. Peters *et al.*. Application of photothermal probe beam deflection technique for ablation and damage measurements by using short UV-laser pulses. *Journal de Physique*, 1994, 4(7): 749~752
- 4 L. Grad, J. Mozina, D. Sustercie *et al.*. Optoacoustic studies of Er:YAG laser ablation in hard dental tissue. *Proc. SPIE*, 1994, 2128: 456~465
- 5 M. Althaus, M. Hugenschmidt. Laser-induced plasmas examined by means of quasi-cinematographic methods. *Proc. SPIE*, 1995, 2502: 732~736
- 6 Shen Ruiqi, Sun Tongju, Dai Shizhi. Photoacoustic model of solid chemical reaction. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1994, A21(10): 821~826 (in Chinese)

Study of Reactivity Photoacoustic Spectra of Graphite in Ablation by a Pulsed Nd:YAG Laser

Shen Ruiqi Ye Yinghua Dai Shizhi

(College of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

Abstract Graphite was ablated by a 400 μ s free-running Nd:YAG laser and the reactivity photoacoustic spectra of ablation were detected. The acoustic spectra of ablation have a special double peak structure which does not depend on the length of the photoacoustic cell. The heavier the ablation is, the faster attenuation the ablating acoustic spectrum has. The rising time of the sound crest of ablation is about 400 μ s. With a 1.10 mm diameter light spot on the surface of graphite, if the laser energy decreases from 320 mJ to 150 mJ, the attenuating time of the sound crest of ablation increases from 3 ms to 8 ms, and the critical ablating energy of graphite is about 65 mJ. The peak value of the sound crest of ablation is directly proportional to laser energy. According to the analysis of the ablated spots by EMS, vaporization of graphite leads to double peaks in the acoustic spectrum and the corrugated surface on the inside surface of the ablated hole.

Key words laser ablation, reactivity photoacoustic spectrum, photoacoustic detection, EMS analysis, graphite