文章编号:1001-5078(2011)03-0298-04 ·光电材料与器件·

几种不同涂层抗 CO_2 激光损伤性能的实验研究

姜玲燕[1],陆耀东[2],辛建国[1]
(1.北京理工大学光电学院,北京 100081;2.北京光电技术研究所,北京 100010)

摘 要:在连续 CO_2 激光辐照下,对比测定了石墨、阳极氧化铝、国外某氧化铝及黑色微弧氧化铝涂层的抗激光损伤阈值和反射率,结果表明氧化铝的抗激光损伤性能优于石墨,损伤阈值可达 16 kW/cm^2;反射率测试结果表明微弧氧化铝对激光吸收大于阳极氧化铝,综合表明微黑色弧氧化铝涂层在激光功率计探头方面有一定的应用前景。

关键词:损伤阈值;反射率;石墨;阳极氧化铝;黑色微弧氧化铝
中图分类号:TN741 **文献标识码**:A

Experimental study on the anti-damage characteristic of several different coatings for CO_2 laser

JIANG Ling-yan[1], LU Yao-dong[2], XIN Jian-guo[1]
(1. School of Optoelectronic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Beijing Institute of Opto-electronic Technology, Beijing 100010, China)

Abstract: The laser damage threshold and reflectivity are two important parameters for laser power and energy detector. Several thermal coatings, including graphite/anodized aluminum/foreign anodized aluminum coating and microarc oxidation (MAO) coating, have been investigated. The results demonstrate that alumina behaves better than graphite, having a damage threshold of approximately 16 kW/cm^2; the reflectivity test shows the MAO coating has a higher absorbance than anodic oxidation. Summarily, MAO coatings are a promising technology for laser detection.

Key words: damage threshold; reflectivity; graphite; anodized aluminum; black MAO coating

1 引 言

随着过去几十年激光技术的飞速发展,CO_2 激光器的峰值功率可达 10^{12} W,单脉冲能量可达10^3 J,平均功率达到 10^4 W[1],而输出功率数万瓦的连续激光已应用于机械加工等领域。激光功率的不断增大,给激光功率、能量的测量提出了巨大的挑战。对于极高的功率密度(兆瓦数量级),采用光电探测的方法对其进行绝对能量测量十分困难[2],而体吸收探测器虽然可以承受很高功率密度,但其响应速度慢,测量周期长,也使它的应用有一定局限性。抗激光损伤阈值高的面吸收涂层可以解决这一问题。在可查阅的文献[3-5]中,谢永杰等人用高纯石墨制作的能量吸收探头在连续 CO_2 激光辐照 1 s 时,可以耐受 8 kW/cm^2 的强激光辐照,方惠英、王春奎利用阳极氧化处理的铝板做激光接收探头,发现该涂层对脉宽 1 μs 的 CO_2 激光,其损伤阈值达 1 J/cm^2,且对 10.6 μm 激光几乎全部吸收,响应时间小于 0.5 s。美国国家标准局的研究人员用碳纳米管制成的探测器在 10.6 μm 的抗损伤阈值可以达到 1.5 kW/cm^2。但是由于激光阈值测定没有标准的测试装置,损伤的判定及阈值的测量方法不同,加上使用仪器的测量精度和系统误差,实验结果可比性较差,因此确定涂层的损伤阈值的标准和方法有待改进。

作者简介:姜玲燕(1986-),女,在读硕士研究生,主要从事激光功率,能量测量仪器方面的研究。E-mail: jly19860614@yahoo.com.cn

收稿日期:2010-11-10;**修订日期**:2010-12-03

本实验采用 10.6 μm 连续 CO_2 激光研究了石墨和氧化铝陶瓷的抗连续激光损伤性能，给出了不同材料、不同工艺的涂层损伤阈值及反射率，同时运用电子崩和多光子电离模型解释了石墨与氧化铝的等离子体损伤，并证明了黑色微弧氧化铝涂层运用在激光能量探测领域的可行性。

2　实　验

涂层的抗激光损伤阈值与多种因素有关，包括材料和加工工艺。本实验分析比较了四种不同材料及工艺制得的涂层损伤阈值和反射率，即烧结石墨涂层、阳极氧化铝涂层、国外灰色氧化铝陶瓷涂层和黑色微弧氧化 Al_2O_3 涂层。上述四种涂层基体同为直径 40 mm，厚度 0.4 mm 的硬铝。实验所用激光器为波长 10.6 μm 的连续 CO_2 激光器，功率为 35 W，使用焦距为 60 mm 的锗透镜将光斑聚焦后照射在样品的涂层表面，用测量烧蚀斑大小的方法测量光斑大小。用积分球测涂层的反射率，实验装置如图 1 所示。

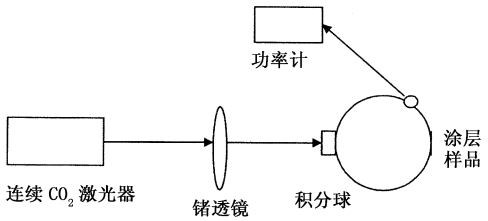

图 1　实验装置图

3　结果及讨论

3.1　损伤阈值

目前，薄膜的激光损伤阈值有两种定义方法，即零损伤概率阈值和 50% 损伤概率阈值[6]。目前普遍认为激光对材料的损伤是由于材料中的杂质对激光的吸收所引起，小面积光斑可以使得辐照区域小，从而测得的激光阈值相应更大，即“光斑效应”。零损伤测试法就是在对测试结果进行统计分析的基础上，取对应于零损伤几率、即能够使材料发生损伤的最小激光能量密度值或功率密度值作为损伤阈值。这种零损伤阈值定义方法可以排除光斑大小对激光损伤阈值的影响[7]。因为本研究光斑很小，所以采用零损伤阈值法定义。

涂层是否发生损伤一般有几种判定方法[8]：光斑形变法、等离子体闪光法、反射光能量法、光热信号法、形貌判断法。涂层经高功率密度激光辐照，辐照位置迅速升温，表面原子通过吸收热量或光子被激发或者发生电离，形成等离子体闪光。通过探测该等离子体闪光就可以间接地对薄膜的损伤进行探测。本实验采用这种等离子体闪光法判定涂层损失。

对聚焦激光光斑直径的测量一般来说有四种方法：CCD 法、刀口法、套孔法以及烧蚀斑法。本实验采用烧蚀斑法测量光斑大小，即在要测量的光束位置，用激光对“敏感相纸”进行烧蚀，用读数显微镜测量其直径，之后计算其面积。这种方法虽然粗略，但不失为一种简便可行的方法。

实验过程中将样品固定在可移动平台上，使聚焦后的激光照射在样品表面，从远及近移动平台，观察到样品发生及其微弱的等离子体闪光后，固定该位置，使样品接受激光辐照 3 min，并测量该处的光斑大小，计算出样品的抗损伤阈值。

四种涂层的损失阈值，如图 2 所示。

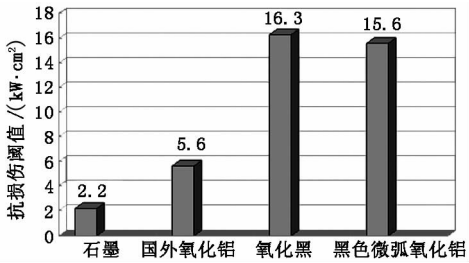

图 2　不同样品的损伤阈值

从实验结果可以看出石墨的损伤阈值最小，只有 2.2 kW/cm^2，而阳极氧化铝的损伤阈值高达 16.3 kW/cm^2。石墨的熔点为 3850 ℃，氧化铝的熔点 2300 ℃，但氧化铝的损伤阈值却高于石墨，从微观原子角度分析其原因可能主要与等离子体闪光的形成机制有关。光学材料的电子崩模型认为[7]，介质原子导带中某个电子可通过入射激光束的能量而加速，如果吸收的能量足够大，这个导带电子就有可能与价电子发生碰撞而使其电离。这样，一个导带电子就变成两个。这两个电子继续重复上述过程，最终使导带电子数急剧增加，直至在样品局部区域形成吸收激光的等离子体。然后通过等离子体与后续激光的相互作用，使得初始损伤发展为宏观的灾难性破坏。在石墨的层状结构中，每个碳原子的周边连接着另外三个碳原子（排列方式呈蜂巢式的多个六边形）以共价键结合，构成共价分子。由于每个碳原子均会放出一个电子，那些电子可以自由移动，因此，自由移动的电子吸收激光能量可以轻易地使表层碳原子电离，进而产生等离子体。氧化铝以共价键形式结合，无富余电子，只能考虑多光子电离机制。多光子吸收模型认为[7]，当入射激光的光子能量大约是固体材料带隙能量的 1/3 时，多光子吸

收会对价带电子的电离过程产生重要的作用。可算出 10.6 μm 激光一个光子的能量为：

$$E = h\nu$$

其中，$\nu = c/\lambda$；h 为普朗克常量，其值为4.14×10^{-15} eV/s；c 为光速，其值为3×10^{8} m/s；λ 为 CO_2 激光波长 10.6 μm，由以上数值可以算出一个波长 10.6 μm 的光子能量为 0.12 eV，而阳极氧化铝的带隙能量在 4.178 ~ 4.256 eV 之间[9]，不符合多光子吸收致电离的条件。此外，从反射率角度分析，石墨对激光能量的吸收大于氧化铝，在相同辐照时间、相同体积内，石墨吸收了更多能量，更易发生原子电离。因此，石墨涂层发生等离子闪光的损伤阈值小于氧化铝。当然，当激光功率密度继续增大，使得氧化铝价电子吸收了足够的能量，也会挣脱共价键的束缚而发生电离。

以上分析从微观原子层面讨论了涂层的等离子体闪光损伤，从宏观角度来看，激光的加载条件、物体的形状、初始和边界条件以及物体的热物理性质（材料的密度、比热容、热导率和热扩散率）都对材料的损伤阈值有非常大的影响。涂层在激光辐照下的温升与损伤过程，是一个非常复杂的激光与物质相互作用的非稳态过程，需要专门的 ANSYS/ABAQUS/ADINA 软件进行分析计算，才能得到较为准确的温度场分布。

3.2 反射率

对四个样品进行反射率测试，结果如图 3 所示。

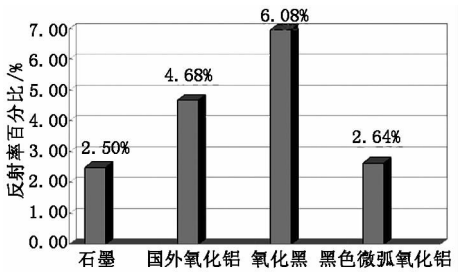

图 3 不同样品的反射率值

从实验结果可以看出，四个样品对 10.6 μm 激光的反射都低于 7%，氧化铝涂层的反射率高于石墨涂层，即石墨的激光能量吸收性能优于氧化铝，这可能是由于石墨颜色更深、更黑的原因；阳极氧化铝（氧化黑）的反射率高于微弧氧化工艺氧化铝涂层，反射率达 6.98%，其原因可能是氧化黑表面光亮，镜面反射严重造成的。从对激光能量的吸收角度来看，石墨及黑色微弧氧化铝更合适用于功率及能量探测。综合抗激光损伤阈值和激光能量吸收两个参数来看，微弧氧化工艺适合加工黑色氧化铝吸收涂层。

4 结 论

由上述实验结果及分析可得出以下结论：

1）氧化物陶瓷在 10.6 μm 波段的抗激光损伤性能高于石墨，其原因可能是因为石墨中的自由电子吸收激光能量电离从而引起等离子放电闪光。

2）阳极氧化和微弧氧化陶瓷涂层的损伤阈值达 16 kW/cm^2，可以应用于较大功率连续 CO_2 激光功率测量。

3）微弧氧化工艺涂层对激光吸收优于阳极氧化工艺，更适合做 CO_2 激光功率、能量吸收探头。

此外，本实验以等离子闪光为损伤的判定标准，实际上等离子闪光只在涂层表面留下细微的浅灰色印迹，对探头的激光吸收性能没有产生实质的影响，也不意味着探头的破坏。因此，实际测量中这些探头可以承受更高功率的激光。不同厚度的微弧氧化工艺加工的涂层表面粗糙程度也不同，而表面粗糙度对损伤阈值也有影响；此外，优良的探头吸收材料除了有高的抗损伤阈值和高的激光能量吸收，还需要快的响应时间，本实验后续工作研究不同厚度超音速等离子涂层的抗损伤性能及其热响应时间。

参考文献：

[1] Meng Fanjiang, Yang Guilong, Li Dianjun, et al. Design of control system for high-power pulsed TEA CO_2 laser[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(8): 843 – 846. (in Chinese)
孟范江，杨贵龙，李殿军，等. 大功率脉冲 TEA CO_2 激光器控制系统设计[J]. 激光与红外，2010，40(8)：843 – 846.

[2] Albertine, J R. Recent high energy laser system tests using the MIRACK/SLBD [J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1871: 229 – 239.

[3] Xie Yongjie, Duan Liuhua, Ji Yunfeng, et al. Development of calorimetric detector for high energy laser energy measurement[J]. Infrared and Laser EngineeringG, 2006, 35: 80 – 86. (in Chinese)
谢永杰，段刘华，戢运峰，等. 高能激光量热式能量探头的研制[J]. 红外与激光工程，2006，35：80 – 86.

[4] Fang Huiying, Wang Chunkui. Experimental research of pure aluminum plate anodized as a probe component of CO_2 laser calorimeter [J]. Laser Journal, 1984, 5: 35 – 39. (in Chinese)
方惠英，王春奎. 阳极化处理铝板作 CO_2 激光能量计探测元件的实验研究[J]. 激光杂志，1984，5：35 – 39.

[5] Krishna Ramadurai, Laurence Lewis, Chris Cromer. et al. Carbon Based coatings for thermal detectors: laser damage and thermal efficiency [J]. Proc. of SPIE, 2006, 6403:

64031G - 7.

[6] Hu Jianping, Ma Zi, Li Wei, et al. 1064 nm Pulse laser damage of oxide coatings[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(2): 262 - 267. (in Chinese)
胡建平,马孜,李伟,等. 氧化物薄膜抗 1064 nm 脉冲激光损伤的特性研究[J]. 光学学报, 2000, 20(2): 262 - 267.

[7] Sun Chengwei. The effect of laser irradiation[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. (in Chinese)
孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.

[8] Xun Lijun, Zhang Xihe, Cai Hongxing, et al. Study on determine damage of photoelectric detector irradiated by high power laser[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(12): 1263 - 1268. (in Chinese)
徐立君,张喜和,蔡红星,等. 强激光辐照硅光电探测器的损失判别研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(12): 1263 - 1268.

[9] Jian Wang, Chengwei Wang, Yan Li, et al. Optical constants of anodic aluminum oxide films formed in oxalic acid solution[J]. Thin Solid Films, 2008, 516(21): 7689 - 7694.