

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0147-03

高负载脉冲氙灯管壁特性实验研究

陈远斌, 贺少勃, 於海武, 杨东, 刘建国, 刘勇, 郭良福, 力一峰, 陈德怀, 王琳

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 实验研究了脉冲氙灯在高负载条件下掺铈石英玻璃管壁的特性, 并对实验结果进行了分析。在氙灯的输入能量为爆炸能量的60%的高负载条件下进行实验, 随着运行发次的增加, 氙灯的电极出现龟裂; 氙灯灯管内壁出现白色花纹、块状乳白色积淀物和丝状裂纹; 石英玻璃释放出的氧气使管内气体的高频火花放电颜色由紫蓝色变为绿色。放电过程中, 灯管主要受冲击波和热负载两方面的作用。通过对冲击波和热负载对灯管作用机理和实验结果的对比分析得出, 热负载是氙灯灯管内壁出现圆环形丝状裂纹等现象的主要原因, 冲击波会加速灯管的破裂。

关键词 激光技术; 氙灯; 管壁特性; 冲击波; 热负载; 丝状裂纹

中图分类号 TN245 **文献标识码** A

Experimental Study on Characteristic of Pulse Flashlamp Envelope at High Load

CHEN Yuan-bin, HE Shao-bo, YU Hai-wu, YANG Dong, LIU Jian-guo,
LIU Yong, GUO Liang-fu, LI Yi-zheng, CHEN De-huai, WANG Lin

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The characteristic of pulse xenon flashlamp envelope, which made of cerium doped quartz glass, was studied experimentally under high input power, and the experimental results were analysed. The experimentation was performed under the condition that the input energy of flashlamp is sixty percent of the explosion energy. With the number of shot increasing, map cracking occurs at the surface of the electrode, and white pattern, milky white deposition and hairline cracks emerge on the inner surface wall of the envelope. The oxygen released from the quartz glass envelope changes the color of the gas under high frequency spark discharge from indigo into green. Shock wave and thermal load are the two main effects on the envelope during the discharge. The analyse results indicate that thermal load is the major reason for hairline crack occurred in the inner wall of envelope and shock wave will accelerate cracking of envelope.

Key words laser technique; flashlamp; characteristic of envelope; shock wave; thermal load; hairline crack

1 引言

目前脉冲氙灯仍然是大口径固体激光放大器的抽运源^[1,2]。随着惯性约束聚变(ICF)研究对固体激光驱动器要求的提高, 对脉冲氙灯的要求也日益上升。要求每支氙灯输入能量高达几万焦耳; 氙灯口径增大到 $\phi 35\sim 50$ mm, 放电弧长达到1400~2000 mm; 随着大型固体激光驱动器同时使用氙灯的数量增加到数百支或数千支, 对氙灯的可靠性和稳定性的要求大幅度地提高。灯管是氙灯的重要组成部分, 因为它执行保持产生弧光的稀有气体的重要任务, 透射激光

放大器的抽运带能量($0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$)、热能($>1.0\ \mu\text{m}$)和紫外能量($<0.4\ \mu\text{m}$)。为了防止紫外光在空气中产生臭氧和在激光玻璃中出现色心, 在熔石英玻璃中加入少量的氧化铈。掺铈石英玻璃能够吸收低于 $0.31\ \mu\text{m}$ 的辐射, 并发出 $0.4\sim 0.65\ \mu\text{m}$ 的荧光, 将提高激光片的抽运效率^[3]。但掺铈石英管的抗冲击强度较纯石英管要差。灯管的可靠性是氙灯稳定运行的前提和关键。本文实验研究了掺铈石英玻璃脉冲氙灯在高负载条件下的管壁特性, 对大尺寸高功率脉冲氙灯的制作和使用有重要意义。

基金项目: 国家863计划惯性约束聚变领域重点项目(0345080)资助课题。

作者简介: 陈远斌(1973—), 男, 苗族, 湖南邵阳人, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心助理研究员, 主要从事高功率激光技术研究。E-mail: cybdlf@163.com

2 实 验

通过在放电时间内积分电压和电流信号的乘积来确定传输到氙灯的电能,即

$$E_{in} = \int_0^{\tau} I(t)V(t) dt. \quad (1)$$

一般把脉冲单次闪光供电电容器上的储能称为灯的负载能量,把灯无损坏的单次闪光最大负载能量称为灯的极限负载能量,通常叫作爆炸能量。国际上通用一个经验公式,即高恩(Goncz)公式^[4]

$$E_x = KLD\sqrt{\tau}, \quad (2)$$

式中 L 为氙灯放电弧长, D 为灯管内径, τ 为放电脉宽。若 L, D, τ 和 E_x 的单位分别取 $\text{cm}, \text{cm}, \mu\text{s}$ 和 J , 则系数 $K=12$ 。

将输入到氙灯的电能 E_{in} 除以氙灯的爆炸能量得到氙灯的爆炸系数 f_x , 进而可以算出氙灯的寿命 N_{life} 。

$$f_x = E_{in}/E_x, \quad (3)$$

$$N_{life} = (f_x)^{-8.58}. \quad (4)$$

实验所用氙灯的内径为 $\phi 32 \text{ mm}$; 放电弧长为 1430 mm ; 灯管为掺铈石英玻璃, 灯管壁厚为 3 mm ; 灯管内填充氙气, 气压为 $2.666 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。用一支氙灯构成放电回路进行高负载实验, 实验装置如图 1 所示。氙灯能源的储能电容为 $495 \mu\text{F}$, 电感为 $40 \mu\text{H}$, 充电电压为 18 kV 。氙灯竖直放置, 且发次之间的时间间隔为 20 min 。用 Tektronix 高压探针和罗斯克夫线圈测量的氙灯的放电电压和电流波形如图 2 所示。测得放电电流峰值为 26.8 kA , $1/3$ 峰值电流处脉冲宽度为 $456 \mu\text{s}$ 。

根据(1)~(3)式可以计算出 $E_{in} = 68.4 \text{ kJ}$, 爆炸能量 $E_x = 113.6 \text{ kJ}$, 爆炸系数 $f_x = 0.6$ 。而氙灯在激光放大器中常规运行的负载 f_x 约为 0.25 , 所以在高负载($f_x = 0.6$)条件下进行实验是为了运行较少的闪光次数就可以检验氙灯是否满足(4)式所计算出的寿命条件。

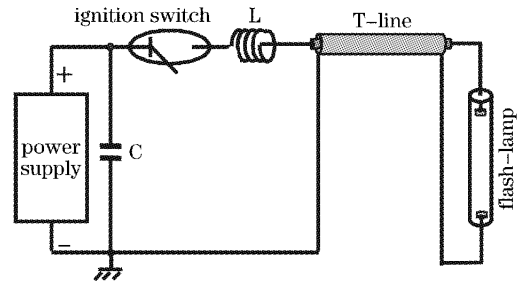


图 1 氙灯放电实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of flash-lamp discharge

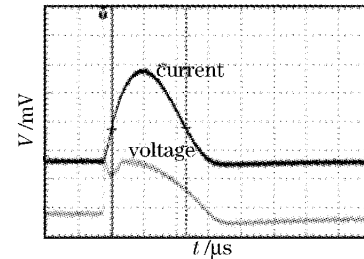


图 2 氙灯放电的电压波形与电流波形

Fig. 2 Waveforms of flash-lamp discharge current and voltage

3 实验结果与讨论

实验发现, 氙灯运行不到 10 发时, 它的两个电极出现龟裂, 且随着运行发次的增加裂纹会加深加密。灯管内壁出现乳状积淀物, 发白区域成块状遍及整个灯管如图 3(a) 所示。在氙灯灯管内壁偶尔会出现白色花纹如图 3(b) 所示, 而且白色花纹的出现是随机的。运行到约 20 发时, 在灯管内壁会出现短的丝状裂纹(即超负载条纹), 随着运行发次的增加, 丝状裂纹的长度会沿圆周发展成弧形或圆环形, 条纹的数量会由两端离电极 30 mm 处向氙灯中间增加, 呈一系列的圆环分布, 但圆环的间距并不相同。在氙灯放电刚结束时, 在强光照射下肉眼就能观察到灯管内有許多白色微粒形成上下对流。当氙灯冷却到室温时, 可以观察到灯管内壁和氙灯下端(竖直)附有白色颗粒物。负载条纹和白色颗粒物如



图 3 氙灯内壁块状乳白积淀物(a), 白色花纹(b)和丝状条纹(c)

Fig. 3 Milky deposition block (a), white pattern (b), hairline crack (c) in inner wall

图 3(c)所示。

当在氙灯两个电极之间施加高压触发脉冲时，气体通常会在灯管轴线附近击穿并形成丝状导电通道。当能量释放到此通道时，周围气体的升温使丝状导电通道迅速扩张，形成圆柱形冲击波。冲击波前和 Related 的高温等离子体从灯管轴线传播到灯管壁上。在放电冲击波作用下管壁内表面承受的是压应力，管壁外表面承受的是张应力。

在高负载条件下，氙灯的电流非常高，电极的顶端遭受严重的热应力。持续的热循环导致电极的表面破裂，金属微粒将从电极分离后溅射到弧光区域。电极溅射物对管壁的玷污增强了管壁表面的破坏效应，一方面是由于金属颗粒嵌入玻璃表面，形成玻璃的表面缺陷，使玻璃的强度降低；另一方面由于金属颗粒的光吸收作用，使其上的局部温度大大升高，因金属的线膨胀系数比石英玻璃大得多而造成玻璃表面应力状态。这种应力的方向为金属颗粒的切线方向，故呈放射形裂纹。

在脉冲放电高温等离子体的作用下，管壁内表面产生了熔融与气化等热效应。J. H. Rosolowski 和 R. J. Charles 研究发现^[5]，表面熔融层及气化层的深度约为几十微米；气化物的主要成分是无定形的 SiO_2 ；管壁气化亦即管壁的表面蚀损可使表面层的密度减少 0.1% 左右。由于表面层与主体石英玻璃密度不同，引起放电后降温过程中收缩率不同，在两者界面上可能产生一定的应力。由于表面层比主体石英玻璃的密度小，因而前者的体积收缩率比后者小，故表面层承受的是压应力。

未经点燃过的氙灯的高频火花放电颜色呈紫蓝色，而实验中发现氙灯的高频火花放电颜色夹有绿色，且随着运行发次的增加，放电颜色基本呈绿色。这说明氙灯中已有氧气。主要是高负载氙灯放电在管壁表面所形成的很高的瞬时温度使 SiO_2 分解为 SiO ，氧气和单质 Si，在内表层形成缺氧率随深度降低的缺氧结构，缺氧结构所产生的结构应力可能造成管壁表面破裂。

放电过程中在高温等离子体的作用下，管壁内表面极薄一层被熔融，放电后，这一表面熔融层又会

迅速冷却、凝固、收缩。由于氙灯放电脉冲的作用时间短，石英玻璃的导热性能差，可以假定管壁内表面熔融层的外围的石英玻璃的温度恒定。在放电之前管壁表面没有应力。当放电开始后，内表面被等离子体加热开始升温，表面层体积膨胀，由于受体积不变的外围部分的牵制，表面层的体积膨胀使其承受压应力。随着管壁温度的进一步升高，表面层熔融，表面层由弹性形变转为塑性形变，故所受应力消失。在峰值电流后内表面开始降温，重新凝固并收缩，在紧连着的体积不变的外围部分的牵制下，收缩的表面承受张应力，是内表面出现丝状裂纹的主要原因。

4 结 论

由于石英玻璃的抗压强度比抗张强度要高一个数量级，如果超负载条纹是冲击波造成的，则应先出现在管壁的外表面上而不是在内表面上。实际上这种超负载条纹只出现在管壁内表面，说明超负载条纹不是冲击波造成的。放电高温等离子体使管壁发生的物理-化学分解，形成乳白色的积淀物使管壁发白，增加了灯管的热吸收，促使灯管内表面气化和熔融。在熔融层冷却收缩过程中的张应力是超负载条纹产生的主要原因，缺氧结构应力和电极溅射物造成的应力是次要因素。因此，超负载条纹主要是由热负载造成的，冲击波将加速灯管的破碎。

参 考 文 献

- 1 H. T. Powell, A. C. Erlandson, K. S. Jancitis. Characterization of high power flash-lamps and application to Nd³⁺ glass laser pumping [C]. *SPIE*, 1986, **609**: 78~94
- 2 V. G. Nikolaevskil, V. A. Gerasimov. Flash lamp exploitation in high-powered Nd³⁺ glass lasers for ICF [C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 583~586
- 3 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 260
W. 克希耐尔 著. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 260
- 4 John H. Goncz. New Developments in electronic flashtubes [J]. *ISA Trans.*, 1966, **5**(1): 28~36
- 5 J. H. Rosolowski, R. J. Charles. Wall deterioration in flash lamps [J]. *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**(5): 1792~1793