

文章编号 1004-924X(2016)12-2988-05

高功率脉冲氙灯灯管的性能

陈佳*, 邵若燕, 崔新强, 郭向朝, 刘建军, 李海兵

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率单元技术研发中心, 上海 201800)

摘要:研究了惯性约束聚变高功率激光驱动器使用的脉冲氙灯灯管(复合石英灯管和掺铈石英灯管)的光谱性能和抗冲击性能。分别对新复合石英灯管、新掺铈石英灯管、放电 14 000 发次的复合石英灯管、放电 14 000 发次的掺铈石英灯管进行了光谱透过率测试和实验对比。结果显示:复合石英灯管和掺铈石英灯管光谱性能都达到了高功率脉冲氙灯灯管的光谱指标,但掺铈石英灯管光谱透过率比复合石英灯管高约 1%。对复合石英灯管和掺铈石英灯管进行了成分测试以验证其光谱性能。结果表明:除铈以外,掺铈石英灯管的其他金属杂质含量均低于复合石英灯管,认为其是掺铈石英灯管光谱性能优于复合石英灯管的一个原因。模拟了氙灯的放电运行,分别对复合石英灯管和掺铈石英灯管进行了动态抗冲击性能测试。结果表明,复合石英灯管的抗冲击性能较掺铈石英灯管高约 6%。

关键词:惯性约束聚变;高功率脉冲氙灯;复合石英灯管;掺铈石英灯管;透过率;抗冲击性能

中图分类号: TM923.323 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162412.2988

Spectra of high power pulsed xenon lamp tubes and their impact resistances

CHEN Jia*, SHAO Ruo-yan, CUI Xin-qiang, GUO Xiang-chao, LIU Jian-jun, LI Hai-bing

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China)

* Corresponding author, E-mail: occasional28@sina.com

Abstract: This paper focuses on the spectral properties and the impact resistances of composite quartz tubes and cerium doped quartz tubes used in the driving optical components of Inertial Confinement Fusion (ICF) laser facility. The spectral transmittances were tested on the selected samples, new composite quartz tube, new cerium doped quartz tube, 14 000 shot composite quartz tube and 14 000 shot cerium doped quartz lamp tube and their spectral properties were compared. It show that the spectral properties of the composite quartz tube and cerium doped quartz tube have all reached spectral index of the high power pulse xenon lamp, and the spectral property of cerium doped quartz tube is about 1% higher than that of composite quartz tube. A composition test of composite quartz tube and cerium doped quartz tube was carried out to verify the tested results. It indicates that the content of metal impurities in cerium doped quartz tube is lower than that of composite quartz tube, which is one of the reasons to explain the phenomenon mentioned above. Finally, the xenon lamp discharge operation was simulated, the impact resistance tests for the composite quartz tube and the cerium doped quartz tube were carried out. The experimental result demonstrates that the shock resistance of the composite quartz tube is about 6%.

收稿日期: 2016-10-11; 修订日期: 2016-11-12.

基金项目: 国家重大科技专项资助项目(No. 1429071A00)

higher than that of cerium doped quartz tube.

Key words: Inertial confinement fusion; high power pulsed xenon lamp; composite quartz tube; cerium doped quartz tube; transmissivity; Shock resistance

1 引 言

高功率激光驱动器作为惯性约束的驱动器的一种,获得了广泛地研究且进展较快。高功率脉冲氙灯是高功率激光驱动器的主要光学元器件。当高功率激光驱动器触发时,数千支高功率脉冲氙灯同时闪亮,输出多束高能激光,任何一支高功率脉冲氙灯失效都会严重影响激光的输出。高功率脉冲氙灯的高效稳定工作保证了多束组激光输出的稳定,并且它的光谱透过率在很大程度上能影响到激光器系统的增益^[1-3]。高功率脉冲氙灯的光谱透过率主要取决于灯管的光谱性能。在高功率脉冲氙灯点燃时,氙灯灯管作为高功率脉冲氙灯的重要部分,承受着灯内气体放电引发的强光辐射、放电冲击波与热冲击,当灯管管壁承受的冲击超过临界时,灯管将会爆裂^[4-6]。脉冲氙灯灯管必须具有优良的抗冲击性能。目前,高功率脉冲氙灯灯管主要有两步法工艺生产的复合石英灯管和连续熔制工艺生产的掺铈石英灯管。两步法工艺采用高频等离子体作热源,石英粉料在等离子火焰下均匀熔化、沉积在旋转且匀速平移的基础管上,一层一层沉积,使基础管的外径逐渐增大,最终形成一定尺寸规格的石英瓷坯。将石英瓷坯经过机械冷加工后,石英瓷在熔炉的加热区域内熔化后,通过牵引使石英柱体缩小,调节牵引速度,拉制成所需尺寸的石英玻璃管。两步法生产的复合石英灯管为双层石英玻璃,内层为石英玻璃,外层为掺铈石英玻璃。连续熔制工艺是采用机械自动投料,石英粉料从上炉口进料,在炉内熔化后,在下料口处连续拉出石英玻璃^[7]。两种生产工艺生产的石英灯管在光谱透过率和抗冲击性能上存在一定差异,所以有必要对复合石英灯管和掺铈石英灯管的性能进一步研究。

2 实验与结果

2.1 脉冲氙灯灯管的光谱性能

2.1.1 新的脉冲氙灯灯管光谱的测试

本文分别选取了新的复合石英灯管样片和掺

铈石英灯管样片(厚度均为 2.5 mm),采用 PerkinElmer Lambda 900 UV Spectrometer 光谱仪进行 200~1 000 nm 的透过率测试。得到光谱透过率曲线如图 1 所示。

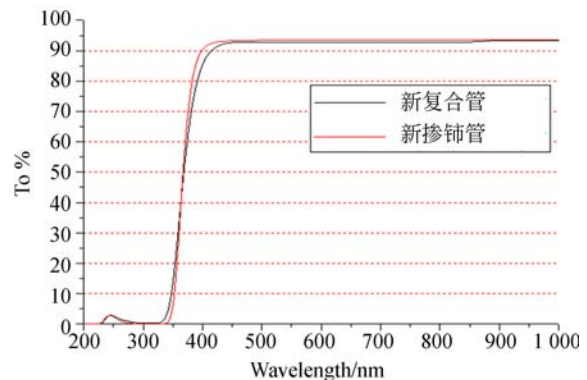


图 1 新复合石英灯管和新掺铈石英灯管的透过率曲线

Fig.1 Spectral transmittance curve of new composite quartz tube and the new cerium doped quartz lamp

从图 1 可以看出,新的复合石英管 and 新的掺铈石英管均达到灯管透过率指标,在 300 nm \geq 波长 \geq 200 nm,透过率 $<$ 3%;波长 \geq 450 nm 时,透过率均 $>$ 92%。在波长 \geq 450 nm 时,掺铈石英管透过率略高于复合石英管,掺铈石英管的光谱性能优于复合石英管。

2.1.2 放电实验后高功率脉冲氙灯灯管光谱的测试

进行放电考核试验的复合石英灯管脉冲氙灯和掺铈石英灯管脉冲氙灯尺寸均为:直径 48 mm,壁厚 2.5 mm,电极间距 1 850 mm。脉冲氙灯放电实验电学参数:工作电压为 22.8 KV,峰值电流平均值为 23.4 KA,峰值功率平均值为 306 MW,峰值功率底宽平均值为 459 μ s,进灯能量/路为 45 KJ,放电时间间隔约为 5 min。复合石英灯管脉冲氙灯和掺铈石英灯管脉冲氙灯各一组通过了 14 000 发次放电考核实验。

分别选取一支经过 14 000 发次放电实验的复合石英灯管 and 掺铈石英灯管解剖,得到壁厚 2.5 mm 的复合石英灯管样片、掺铈石英灯管样片,采用 PerkinElmer Lambda 900 UV Spectrometer 光谱仪分别进行 200~1 000 nm 的透

率测试,得到光谱透过率曲线如图 2 所示。

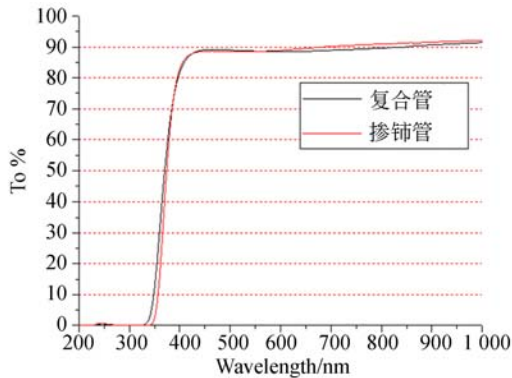


图 2 14 000 发次复合石英灯管和 14 000 发次掺铈石英灯管的透过率曲线

Fig. 2 Spectral transmittance curve of 14 000 shots composite quartz tube and 14 000 shots cerium doped quartz lamp tube

从图 2 可以看出,复合石英灯管和掺铈石英灯管在放电 14 000 发次后,掺铈石英灯管可见光区域光谱透过率略高于复合石英灯管。综合图 1 可以看出,在波长 ≥ 450 nm 时,复合石英灯管和掺铈石英灯管光谱透过率均有明显下降。复合石英灯管光谱透过率从 92% 左右下降到 90% 左右,掺铈石英灯管光谱透过率从 93% 下降到 91% 左右。

2.1.3 复合石英灯管和掺铈石英灯管掺杂微量元素含量的测试

使用电感耦合等离子体—发射光谱测试 (ICP) 对新复合石英灯管 1#、新掺铈石英灯管 2#、14000 发次复合石英灯管 3#、14000 发次掺铈石英灯管 4#,进行元素分析,得到 Al、Ca、Ce、Ba、Fe、Ti 在 1#、2#、3#、4# 样品中的含量。

表 1 新复合管、新掺铈管、14 000 发次复合管、14 000 发次掺铈管微量元素的含量

Tab. 1 Content of trace elements in the new composite quartz tube, the new cerium doped quartz tube, 14 000 shots composite quartz tube and 14 000 shots cerium doped quartz lamp tube

样品	Al	Ca	Ce	Ba	Fe	Ti
1#	257 ppm	4 ppm	0.11%	2 ppm	1 ppm	206 ppm
2#	108 ppm	1 ppm	0.21%	2 ppm	1 ppm	102 ppm
3#	341 ppm	3 ppm	0.13%	2 ppm	4 ppm	268 ppm
4#	117 ppm	6 ppm	0.22%	2 ppm	2 ppm	103 ppm

通过表可以看出,1# 样品 Al、Ca、Ba、Ti 的含量较 2# 样品都高,3# 样品 Al、Ca、Ba、Ti 的含量较 4# 样品都高,可以看出 1# 样品 Ce 的含量较 2# 样品低,3# 样品 Ce 的含量较 4# 样品低,说明复合石英管除 Ce 以外的金属杂质含量高于掺铈石英管,复合石英管 Ce 含量低于掺铈石英管。Ti 和 Ce 在石英管中主要以 TiO_2 、 CeO_2 形式存在。含铈离子的石英管在 200~400 nm 波段对紫外有吸收,在 320 nm 处存在一个很强的吸收峰。掺铈石英管是在 H_2 下熔制的,在 800~1 100 $^{\circ}C$ 时,有 $Ce^{4+} \rightleftharpoons Ce^{3+}$, Ce^{4+} 向 Ce^{3+} 转变,吸收峰向长波方向移动, Ce^{4+} 滤紫外的效果比 Ce^{3+} 更为显著^[8,9]。复合石英灯管中 Ce 元素含量低于掺铈石英灯管,且掺铈石英灯管 Ce^{4+} 向 Ce^{3+} 转变率更高,所以复合石英灯管吸收率更高,透过率低于掺铈石英灯管。 TiO_2 在石英管的含量能影响截紫波长范围,当 TiO_2 含量增高时,截紫波长向长波方向移动^[8,9]。复合石英灯管中 TiO_2 含量高于掺铈石英灯管,复合石英灯管截紫波长相对于掺铈石英灯管向长波方向移动,则复合石英灯管长波方向透过率会低于掺铈石英灯管。铈含量高于复合石英管,除铈以外的金属杂质含量低于复合石英灯管,是掺铈石英灯管光谱性能优于复合石英灯管的一个原因。

2.2 脉冲氙灯灯管的抗冲击性能

复合石英灯管脉冲氙灯和掺铈石英灯管脉冲氙灯均通过了 14 000 发次放电考核,证明复合石英灯管和掺铈石英灯管抗冲击性能都能达到氙灯灯管的技术指标。为更确切的比较复合石英灯管和掺铈石英灯管抗冲击性能,需要对灯管进一步的研究。

2.2.1 模拟氙灯放电运行

高功率脉冲氙灯放电时,灯内气体产生的径向冲击波超过灯管抗冲击临界值时能导致灯管壁炸裂。模拟氙灯放电运行:脉冲大电流放电会引起金属丝在水中爆炸。当长的金属丝瞬间通以高峰值脉冲电流时会迅速汽化,其蒸汽体积剧烈膨胀产生类似气体放电灯在大功率脉冲驱动下瞬间导通形成放电沟道并立即快速扩大的现象^[10-13]。将金属丝置于密闭的石英管中,管内充满水,在高峰值脉冲电流通过时金属丝汽化并产生冲击波,利用水的不可压缩性,此放电冲击波从金属丝位置快速传递至石英管。当放电的电压超过临界值

时,灯管抗冲击波性能也超过极限强度,灯管将发生爆裂。通过动态实验,改变放电电压,得出掺铈石英管和复合石英管的抗冲击性能。模拟氙灯放电实验装置图原理如图 3 所示。

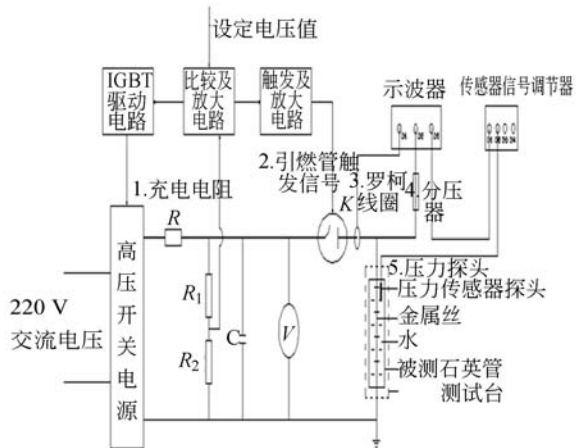


图 3 模拟氙灯放电实验装置图原理图

Fig. 3 Simulation of xenon lamp discharge experiment device principle diagram

2.2.2 氙灯灯管抗冲击性能测试

选取直径为 48 mm,壁厚 2.5 mm,长 200 mm 的复合石英灯管和掺铈石英灯管各 3 段,进行抗冲击性能实验。通过改变电压得到以下数据,如表 2 所示。

表 2 不同电压下灯管损坏情况

Tab. 2 Lamp tube damage under different voltage

灯管	电压/kV	放电能量/J	灯管情况
掺铈管	3.35	258	完好
掺铈管	3.5	282	灯管一端爆裂
掺铈管	3.7	315	灯管全部爆裂
复合管	3.5	282	完好
复合管	3.6	298	灯管一端炸裂
复合管	3.75	323	灯管全部爆裂

参考文献:

[1] POWELL H T, EELANDSON A C, JANCAITIST

表 2 中放电能量通过 $E=1/2 CV^2$ [6] 计算所得,其中 C 为储能电容 46 μF ,V 为放电电压。从表 2 中可以得出,掺铈石英灯管在放电电压为 3.35 kV 时,灯管承受的能量为 258 J,灯管能承受放电产生的冲击波;复合石英灯管在放电电压为 3.5 kV 时,灯管承受的能量为 282 J,灯管能承受放电产生的冲击波。当电压为 3.5 KV 时,掺铈石英灯管爆裂,可知掺铈石英灯管爆裂的临界电压约为 3.5 KV,承受的能量约为 282 J;当电压为 3.6 KV 时,复合石英灯管爆裂,可知复合石英灯管爆裂的临界电压约为 3.6 KV,承受的能量约为 298 J。通过比较,复合石英灯管抗冲击性能优于掺铈石英灯管。

3 结 论

通过比对新复合石英灯管、新掺铈石英灯管、放电 14 000 发次的复合石英灯管、放电 14 000 发次的掺铈石英灯管的光谱透过率,发现复合石英灯管、掺铈石英灯管都满足(300 nm \geq 波长 \geq 200 nm,透过率 $<$ 3%;波长 \geq 450 nm 时,透过率均 $>$ 92%)的氙灯灯管光谱指标。在波长 \geq 450 nm 时,新的掺铈石英管透过率略高于新的复合石英管,放电 14 000 发次的掺铈石英灯管光谱透过率比放电 14 000 发次的复合石英管高约 1%。掺铈石英管的光谱性能优于复合石英管。铈含量高于复合石英管,除铈以外的金属杂质含量低于复合石英灯管,是掺铈石英灯管光谱性能优于复合石英灯管的一个原因。模拟氙灯放电运行,得到了动态石英灯管抗冲击性能的数据,发现复合石英灯管抗冲击性能较掺铈石英灯管高约 6%。

K S. Characterization of high power flashlamps and application to Nd: Glass laser pumping[J]. Proc. SPIE, 1986, 609: 78-94.

- [2] POWELL H T, ERLANDSON A C, JANCAITI-SAT K S, *et al.*. Flashlamp pumping of Nd: glass disk amplifiers [J]. *SPIE*, 1990, 1277: 103-120.
- [3] NIKOLAEVSKII V G, GERASIMOV V A. Flashlamp exploitation in high-powered Nd: glass laser for ICF[J]. *Proc. SPIE*, 1995, 2633: 583-586.
- [4] 李海兵, 胡丽丽, 林文正, 等. 脉冲氙灯用截紫外石英玻璃管性能的研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(6).
LI H B, HU L L, LIN W ZH, *et al.*. Study on properties of cerium-doped silica glass tube for xenon flash lamp[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(6). (in Chinese)
- [5] REHMET M. Xenon lamps. [J]. *IEE PROC*, 1980, 127(3).
- [6] 《脉冲氙灯》编写组, 脉冲氙灯[D]. 上海人民出版社, 1975: 115-141.
《Xenon flash lamp》Editors, *Xenon flash lamp*[D]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 1975: 115-141. (in Chinese)
- [7] 王玉芬, 刘连城. 石英玻璃[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
WANG Y F, LIU L CH. *Silica Glasses*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [8] 顾真安 掺铈石英玻璃的光谱吸收和发光性能[J]. *硅酸盐学报*, 1983, 11(4).
GU ZH A. Spectrum absorption and luminescence properties of cerium doped silica glass. [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1983, 11(4). (in Chinese)
- [9] 钱志真, 宋国伟. 电光源用掺铈-钛电熔无臭石英玻璃管的研制[J]. *玻璃与搪瓷*; 1992, 04.
QIAN ZH ZH, SONG G W. Electromelted Quartz Glass Tubes Doped with Ce-Ti for Making Non-Ozone Light [J]. *Glass & Enamel*, 1992, 04. (in Chinese)
- [10] 周庆, 张俊, 谭向宇, 等. 铜丝水中电爆炸的实验[C]. *中国核科学技术进展报告*, 2009.
ZHOU Q, ZHANG J, TAN X Y, *et al.*. Wire electrical explosion experiments in water [C]. *Report on the progress of nuclear science and technology in China*, 2009. (in Chinese)
- [11] 张标, 张兴权, 王海荣, 等. 管材无凹模激光冲击波冲孔数值模拟[J]. *模具工业*, 2011, 37(11), 30-32.
ZHANG B, ZHANG X Q, WANG H R, *et al.*. Numerical simulation of Piercing free of die on pipe via laser shock wave [J]. *Mould industry*, 2011, 37(11), 30-32. (in Chinese)
- [12] 贺红亮, 经福谦, 金孝刚, 等. 冲击波极端条件下玻璃的细观结构破坏[J]. *高压物理学报*, 1998, 12(4): 241-249.
HE H L, JING F Q, JIN X G, *et al.*. Microstructure damage of glasses under shock wave compression [J]. *Chinese journal of high pressure physics*, 1998, 12(4): 241-249. (in Chinese)
- [13] 宁心, 李晓炎, 杨志焱, 等. 水下冲击波和空气冲击波传播速度及物理参数的对比研究[J]. *解放军医学杂志*, 2004, 29(2), 97-99.
NING X, LI X Y, YANG ZH H, *et al.*. A comparative study propagation speed and physical parameters of underwater blast wave and air blast wave [J]. *Med J Chin PLA*, Vol 29(2), 2004, 97-99. (in Chinese)

作者简介:



陈 佳(1982—), 男, 江西上饶人, 硕士, 助理研究员, 2009 年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得硕士学位, 主要从事高功率脉冲氙灯制作工艺的研究。E-mail: occassional28@sina.com