

高功率涡流稳弧闪光灯

汤星里 陶永祥 金庭臻 陈莉菲 赵九源

(中国科学院上海光机所)

提要: 我们研制成了用高速涡流气体产生的压力梯度场来稳定脉冲放电电弧的高功率涡流闪光灯。当工作氙气的流量为5升/秒时,已经实现了工作频率为110次/秒的万瓦放电。放电的峰值电流最大达20千安,放电闪光上升时间为1~1.5微秒,脉宽为3~4微秒,发光效率达30%。本文报告了这种灯的结构,灯的放电电路、灯内压力梯度场的分布、灯的电光特性和灯的功率平衡分析等结果。

A high power vortex gas flow stabilized flashlamp

Tang Xingli, Tao Yongxiang, Jin Tingzhen, Chen Lifei, Zhao Jiuyuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: A unique vortex gas flow stabilized flashlamp has been developed for dye laser pumping. With a $3\mu\text{s}$ current pulse the flashlamp can operate at up to 100J/pulse and a pulse repetition rate of up to 100 pulse/sec. An average input electric power of 10kW and a maximum electro-optic conversion efficiency of 35% have been achieved.

一、引言

要泵浦高平均功率的染料激光器,大量的工作表明,常用的同轴或直管闪光灯遇到许多困难。因为,染料要求泵浦灯的闪光脉冲有快的上升前沿和窄的脉宽。当放电脉冲能量增大时(>100 焦耳/脉冲),同轴或直管灯所遇到的第一个困难就是放电冲击波使灯爆炸。与一般的长脉冲($>$ 几百微秒)闪光灯相比较,短脉冲灯的爆炸极限能量低得多。第二个困难是灯管蒸发、电极烧蚀使灯的寿命明显缩短,同轴灯约为 $10^3\sim 10^4$ 次,直管灯约为 $10^4\sim 10^5$ 次。

为了克服同轴和直管灯所遇到的困难,人们提出了用高速气体涡流稳定电弧的涡流灯的概念^[1]。这种灯的特点是:由于涡流压力梯度场的稳弧作用,使弧柱与管壁分离,消除了管壁的蒸发,减弱了冲击波对管壁的作用强度,从而提高了灯的爆炸极限能量。此外,高速涡流气体不仅带走了大部分等离子体的热量,大大降低了灯壁的热负载,而且带走了所有的电极烧蚀物,大大延长了灯的寿命。

作为发展高平均功率染料激光器的第一步,我们研制成了万瓦涡流稳弧闪光灯。所得结果在发光效率等方面高于国外同类工作

收稿日期:1982年4月1日。

的结果^[9]。

我们的工作还表明，有些作者所担心的这种灯效率低、不能长期连续工作等问题，实际上也是可以解决的。

二、原理和结构

涡流灯的原理见图1所示。将工作气体(Ar加少量N₂)在灯管切线方向上向灯轴仰起 θ 角，从阴极下端的环形喷嘴中以大约30米/秒的速度射入灯内，形成涡流。这种涡流所产生的向心力在灯截面上形成一个很陡的压力梯度场，使灯轴上造成一个低压区；此外，这种高速涡流气体在轴向上的流动，在灯截面上还形成一个很陡的温度梯度场，使得轴线向外的温度逐渐降低。由于这二个梯度场的作用，便使放电弧柱稳定在灯的轴线上。我们研制的涡流灯的结构如图2(a)(见彩色插页)及(b)所示。它分别由阳极、阴极、灯管、冷却套等构成。整个灯体是可拆式的，用橡胶“O”圈和聚四氟乙稀圈进行密封。

形成高速气体涡流场的主要部件是阴极，其结构见图3所示。在阴极的下部有一个气室，在气室外圆周面上均匀分布有喷孔，喷孔的位置保证将气体沿灯管的切线方向，并向灯轴仰起 12° 而射出，孔的直径根据所

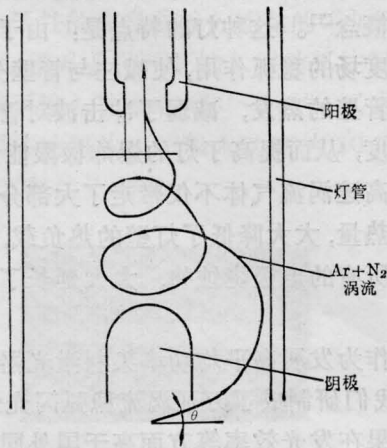


图1 涡流灯原理

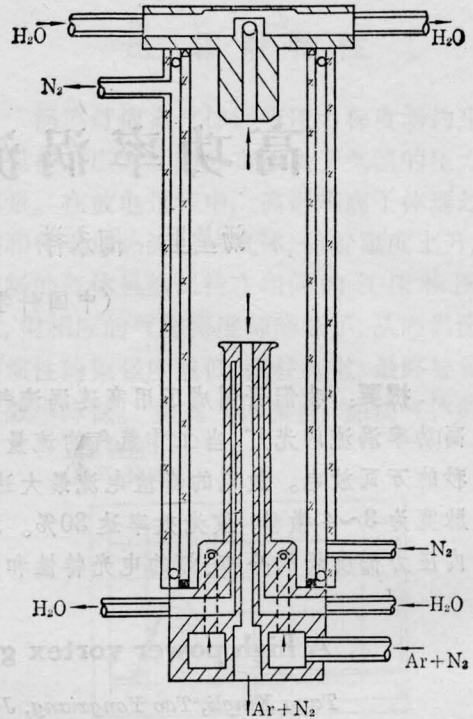


图2(b) 涡流灯的结构图

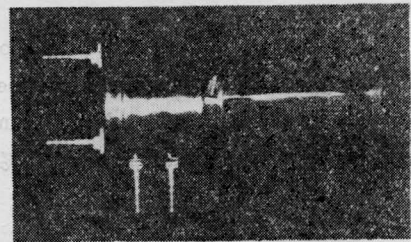


图3 阴极系统实体照片

需的流量和流场的均匀性进行了仔细的选择。我们设计了 $\phi 1.5$ 毫米8孔和 $\phi 2.0$ 毫米4孔两种阴极系统。为了在主放电区形成一个稳定的涡流场，需要有足够长的过渡区，因此，我们将气室喷孔与阴极端面之间的距离选为 ~ 100 毫米。阳极头采用直径为22毫米的钨铜板，阴极采用直径为22毫米的铈钨板，它们都分别通水冷却。在二电极的中心都开有直径为5毫米的排气孔。管壁外面装有氮气冷却套。这种结构的灯，在氩气流量为5升/秒时，已经工作到1万瓦的功率水平。

三、流场的压力分布

由于涡流灯的放电等离子体是靠高速气体涡流所形成的压力梯度场来控制 and 稳定的,因此,测定流场的压力分布和均匀性是十分重要的。这可以通过在灯体横截面上移动皮托管式压力计的压力探针而逐点测得。探针的选择应该尽可能不影响流场的分布。实验采用内孔直径为 1.2 毫米不锈钢探针。分别在阴极、阳极和弧柱中心部位进行了测量,测量结果如图 4 所示。结果给出了 $\phi 2.0$ 毫米 $\times 4$ 孔和 $\phi 1.5$ 毫米 $\times 8$ 孔两种阴极灯在各种不同气压下极间中心截面径向上的压力分布。在距离轴线 2.5 毫米处可以看到有明显的压力突变区,中心低压区和管壁附近高压区的压差比为 1:0.6,高压场区的厚度约为 14 毫米。实验比较了弧柱中心区和电极附近区场的分布,所得结果基本一致,这证实了整个放电区涡流场的压力分布是均匀的。从放电过程中等离子体弧柱直径变化的均匀性也证实了这一点。

四、电学特性

涡流灯的供电回路和一般重复率短脉冲放电电源类同,三相市电经桥式整流后进行共振充电。但由于涡流灯的气压比较高 (~ 1.5 大气压),而且为了提高气体的击穿电压还掺杂有分子性惰性气体 N_2 ,所以,用一般方式点燃很困难,必须采用高压击穿预电离点燃,预燃电压为 25~30 千伏,电流为 100 毫安。实验表明, N_2 的掺杂量在 2~10% 为好,否则击穿电压过高,或预电离弧柱易被主放电淬灭。

在高平均功率点燃时,放电电路的关键元件是开关,它要能承受高的峰值电流和平均电流,并且损耗要小,要能长期工作。我们选用充氢脉冲闸流管,并直接接入高压端回

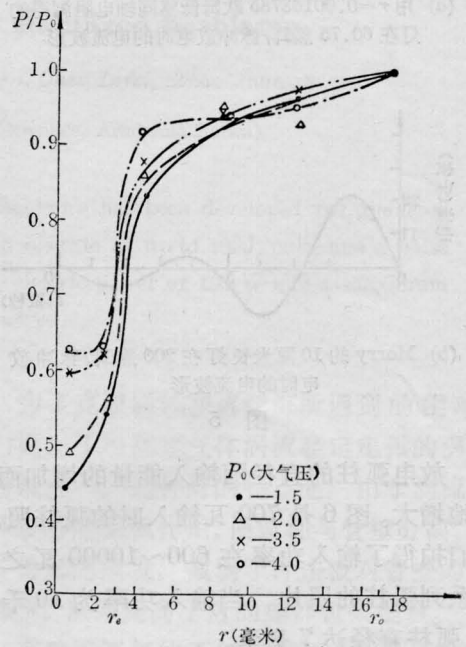
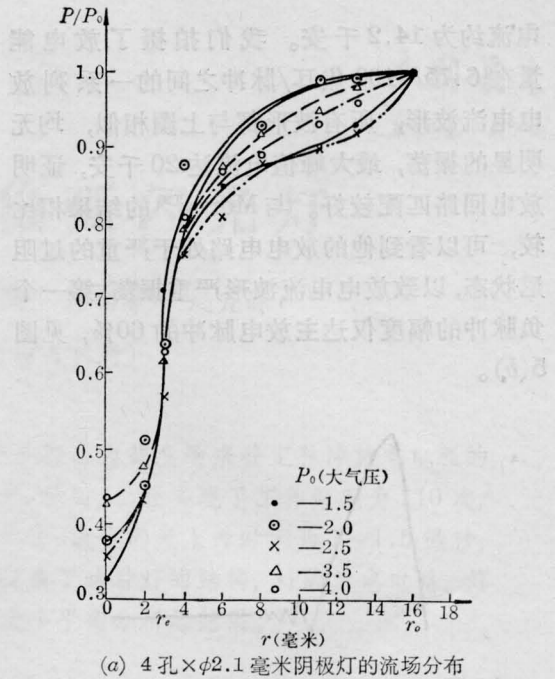
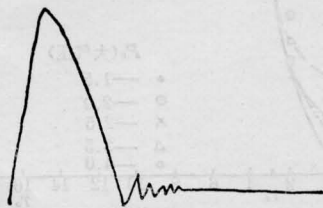


图 4 涡流灯极间中心截面上的压力强分布
 r —以轴线为起点的截面半径; P —半径为 r 处的气压; P_0 —灯管内壁处的气压

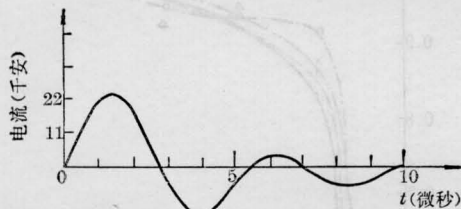
路,既作开关又作主回路对高压预电离回路的隔离管,工作稳定,损耗小,电路简单。

图 5(a) 为涡流灯在 60.75 焦耳/脉冲输入时的放电电流波形,脉宽约为 4 微秒,峰值

电流约为 14.2 千安。我们拍摄了放电能量在 6.75~100 焦耳/脉冲之间的一系列放电电流波形，所有波形都与上图相似，均无明显的振荡，最大峰值电流达 20 千安，证明放电回路匹配较好。与 Morry^[9] 的结果相比较，可以看到他的放电电路处于严重的过阻尼状态，以致放电电流波形严重振荡，第一个负脉冲的幅度仅达主放电脉冲的 60%，见图 5(b)。



(a) 用 $r=0.00168785$ 欧姆低感同轴电阻测得的灯在 60.75 焦耳/脉冲放电时的电流波形



(b) Morry 的 10 厘米长灯在 200 焦耳/脉冲放电时的电流波形

图 5

放电弧柱的直径随输入能量的增加而缓慢地增大。图 6 是 700 瓦输入时的弧柱照片，我们拍得了输入功率在 600~10000 瓦之间一系列弧柱的照片。当输入功率为 10 千瓦时，弧柱直径达 7 毫米。

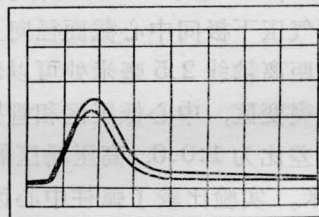


图 6 灯在 18.75 瓦放电时的弧柱照片

五、辐射特性

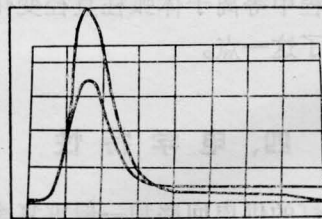
涡流灯依靠气体涡流压力梯度场约束放电弧柱，压力场的分布取决于气流的压力和流量。在放电过程中，高温等离子体通过辐射和传导加热流过的气体，随着温度上升，压力场的气体虽然保持在相同的气压和压差上，但相应的气体密度却降低了，从而涡流场的惯性约束强度减低，弧柱弥散，最终导致辐射效率降低。提高气体流量，加快气体的置

放电能量
(焦耳/脉冲)



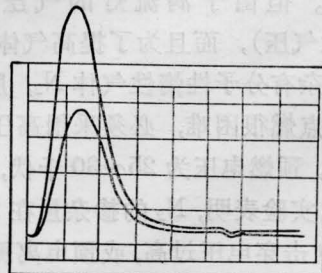
(a)

510 瓦输入



(b)

1160 瓦输入



(c)

1520 瓦输入

图 7 涡流灯闪光波形

时标: 2 微秒/厘米; 灵敏度: 2 伏/厘米; 每幅图中上面的波形为大流量(2.7 升/秒), 下面的波形为小流量(1.7 升/秒)时的结果

换速率,可以减小气体温升,增加气体密度,提高辐射效率。图7示出了用DG-10型强流光电管探测到的涡流灯闪光波形。在相同输入功率时,辐射峰值强度随气体流量而增大。输入功率越高,增大速率就越快。当输入功率为1520瓦时,流量增大59%,则辐射峰值强度增大100%。

图8是用定标的HW-1型半导体真空辐射热电偶测得的灯在流量为3.86升/秒时的绝对辐射输出能量和绝对辐射效率曲线。当流量不变时,从图上可以看到,尽管辐射输出能量不断随着输入能量而增加,但辐射效率却渐趋饱和。当输入增加到1万瓦时,光效下降到26%;而在低功率输入时,最高光效可达35%。由此可见,在高功率输入时,流量应进一步提高,以加快气体的置换速率。就目前实验所达到的流量而言,气体相对灯体的置换速率为38次/秒,相对弧柱的置换速率为180次/秒。灯的闪光频率为100~110次/秒。

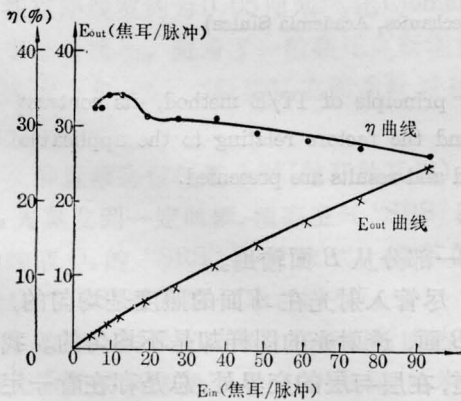


图8 灯的绝对辐射输出和绝对光效曲线
放电条件: $C_D=1.5$ 微法, $P_{进口}=2.8$ 大气压;
 $F=3.86$ 升/秒; $f=100$ 次/秒

六、功率平衡

灯放电时,电容器储能是在放电电路中各部分的分布,是我们确定电路各元件承受的

热负载从而指导我们正确选择元件参数的重要依据。根据涡流灯的工作机制,可以将灯的输入功率在电路中的分布定性确定为如下六个部分:(1)光辐射功率 $W_{光}$; (2)等离子体和冲击波对氩气的加热,使氩气的内能增加的功率 Q_{Ar} ; (3)冷却套内冷却氮气带走的功率 Q_{N_2} ; (4)电弧对电极的加热功率 $W_{电极}$; (5)冲击波转变成声波的功率 $W_{声}$; (6)开关和回路电阻的损耗 $W_{开关}$ 。这六部分功率的分配,以 $W_{in}=5.238$ 千瓦输入时为例,可以估算如下:

(1) 由光效曲线图8可知: $W_{光}/W_{in}=29\%$,考虑灯内镇定区的影响,实际 $W_{光}/W_{in} \approx 34\%$ 。

(2) Q_{Ar} 的大小由如下质量方程估算: $Q_{Ar}=mC_p\Delta T$, 其中 m 是 Ar 的质流速率,当气压为 3.4 大气压,流量为 4.4 升/秒时, $m=26.71$ 克/秒, C_p 是 Ar 的定压比热, $C_p=0.5$ 焦耳/克·度, ΔT 为 Ar 的温升,由实验测得 $\Delta T=194^\circ C$ 。所以, $Q_{Ar}=2694.9$ 瓦, $Q_{Ar}/W_{in}=51.4\%$ 。

(3) Q_{N_2} 同理也由上述质量方程算得,当 N_2 压力为 0.7 大气压,流量为 1.7 升/秒时, $m=1.4875$ 克/秒, $C_p=1.03493$ 焦耳/克·度, ΔT 实测为 $33^\circ C$, 则 $Q_{N_2}=50.8$ 瓦, 所以 $Q_{N_2}/W_{in}=1\%$ 。

所以 $W_{光}+Q_{Ar}+Q_{N_2}/W_{in} \approx 87.2\%$, 则余下三部分功率便约占总输入的 12.8%。如果按 Morry 的估计, $W_{声}/W_{in} \approx 2.6\%$, $W_{电极}/W_{in} \approx 10\%$, 则我们电路中的闸流管和回路电阻的损耗是很小的,不超过 1%。再加上我们采用了阻尼二极管,增大了电路匹配范围,消除了放电振荡,这可能就是我们灯的光效比较高的原因。

参 考 文 献

- [1] M. E. Mack; *Appl. Opt.*, 1974, 13, 46~55.
[2] W. W. Morry et al; AD-A017272.