

# 用于大功率大能量激光器电源的 吸能电阻的计算和有关设计

霍 苑

本文给出了用于大功率大能量激光器电源的吸能电阻阻值和功率容量的计算方法，并以电子束控制放电CO<sub>2</sub>激光器的主放电电源为例，简要说明吸能电阻的计算和有关设计。

为了研究激光核聚变和高能激光武器，大功率大能量激光器得到了迅速的发展。而大功率大能量激光器的电源，一般都有储能相当大的电容器或电容器组。这些电容器在不加电压的情况下，一般都通过一个接地的吸能电阻（以下简称为放电棒），将电容器两端短路并接地。要启动高压电源时，把放电棒移去再给电容器充电。但有时在电容器充电之后，由于某种原因需要立即停止实验，进行检查，因此要断开电容器电源，将已充电的电容器通过放电棒短路并接地，这时全部电容器储能都要经过放电棒泄放。如果吸能电阻的功率容量不够，该电阻就可能损坏甚至引起爆炸<sup>(1)</sup>。

## 一、吸能电阻阻值的计算

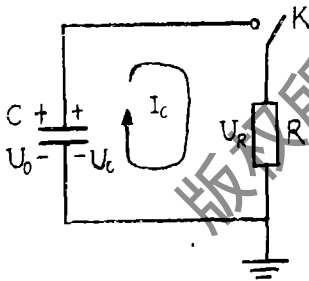


图1 等效线路

用放电棒将电容器短路并接地时的等效线路如图1所示。

设电容器C的充电电压为 $U_0$ ，用放电棒给电容器C放电时，相当闭合线路中的K开关，此时电容器C就通过吸能电阻R放电。

根据电工基础知识，这个放电过程是一个充电至 $U_0$ 的电容器C，通过电阻R放电的过渡过程。电路中电流 $I_C$ ，电阻两端电压 $U_R$ 及电容电压 $U_C$ 的表达式<sup>(2)</sup>如下：

$$U_C = U_R = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1)$$

$$I_C = I_R = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2)$$

收稿日期：1983年9月8日。

由(1)式和(2)式可计算出 $U_R$ 随 $\tau$ 的变化并示于表1。

表1  $U_R$ 随 $\tau$ 的变化

t	0	$\tau$	$2\tau$	$3\tau$	$4\tau$	$5\tau$	$6\tau$	$7\tau$
$U_R = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$	$U_0$	$0.3679U_0$	$0.1353U_0$	$0.0498U_0$	$0.0183U_0$	$0.0067U_0$	$0.0025U_0$	$0.0009U_0$

由表1可知：当 $t > 5\tau$ 时， $U_R < 1\% U_R(0)$ ， $I_R < 1\% I_R(0)$ ，在一般应用中，可认为过渡过程已结束。但在高功率大能量激光器电源中，因为储能电容器往往都充很高的电压，例如几万伏电压，即使剩余1%，仍然有几百伏，这是不安全的。为使 $U_C$ 降至安全电压附近，则需时间

$$t \geq 7\tau \quad (3)$$

$\tau = RC$ ，当 $C$ 一定时， $R$ 越小，则 $\tau$ 越小，放电就越快， $U_C$ 降至安全电压所需要的时间(约为 $7\tau$ )也越短。这是希望的。

$I_R(0) = \frac{U_0}{R}$ ，当 $U_0$ 一定时， $R$ 越大，则 $I_R(0)$ 就越小，也即流过 $R$ 横截面积上的电流密度就越小，这有利于吸能电阻的安全使用。

兼顾以上两点要求，可以选定吸能电阻 $R$ 的阻值。

## 二、吸能电阻功率容量的计算

由(1)式和(2)式，可以推导出吸能电阻 $R$ 所吸收的瞬时功率 $P_R(t)$ 的表达式：

$$P_R(t) = U_R \cdot I_R = \frac{U_0^2}{R} e^{-\frac{2}{RC}t} \quad (4)$$

当 $t=0$ 时， $P_R(t) = P_R(0)$ 是初始瞬时功率，也是吸能电阻 $R$ 所吸收的最大瞬时功率，表示为：

$$P_R(0) = P_{R\max} = \frac{U_0^2}{R} \quad (5)$$

假设在 $0 \sim t_0$ 这段时间内，电容器 $C$ 上的电压已降至安全电压，则吸能电阻 $R$ 所吸收 $C$ 的能量为：

$$W_R = \int_0^{t_0} P_R(t) dt = \int_0^{t_0} \frac{U_0^2}{R} e^{-\frac{2}{RC}t} dt = -\frac{CU_0^2}{2} \left[ e^{-\frac{2}{RC}t_0} - 1 \right] \quad (6)$$

由于 $t_0 \geq 7\tau$ ，因此 $e^{-\frac{2}{RC}t_0} < 1$ ，则 $W_R$ 为正值。

在 $0 \sim t_0$ 这段时间内，吸能电阻 $R$ 吸收的平均功率 $\bar{P}_R$ 可表示为：

$$\bar{P}_R = \frac{W_R}{t_0} = -\frac{CU_0^2}{2t_0} \left[ e^{-\frac{2}{RC}t_0} - 1 \right] \quad (7)$$

由 $\bar{P}_R$ 和 $P_{Rmax}$ 可以确定吸能电阻R的功率容量 $P_R$ , 即 $P_{Rmax} \geq P_R > \bar{P}_R$  (8)

### 三、计算举例

现以我们研制的电子束控制放电CO<sub>2</sub>激光器<sup>[3]</sup>的主放电电源为例来具体说明。

电子束控制放电CO<sub>2</sub>激光器的主放电电源为两个4微法/50千伏的电容器并联, 工作时

充电至45千伏, 所以此电源的总储能 $W = \frac{1}{2}CU_0^2 = 8100$ 焦耳。现计算吸能电阻的阻值及功率。

#### 1. 吸能电阻阻值的计算

根据已知条件:  $C = 2 \times 4 \times 10^{-6}$ 法,  $U_0 = 45 \times 10^3$ 伏, 当R分别取不同数值时, 利用 $\tau = RC$ 和 $I_{Rmax} = U_0/R$ , 计算 $\tau$ 和 $I_{Rmax}$ , 并进行比较, 最后选定 $R = 10 \times 10^3$ 欧。

#### 2. 吸能电阻功率容量的计算

根据已知的C和选定的R求 $\tau$ :

$$\tau = RC = 10 \times 10^3 \times 8 \times 10^{-6} = 8 \times 10^{-2} \text{ (秒)}$$

由(3)式求 $t_0$ :

$$t_0 = 7\tau = 7 \times 8 \times 10^{-2} = 0.56 \text{ (秒)}$$

将已知的R, C代入(6)式求 $W_R$ :

$$W_R = -8100 [e^{-14} - 1] = 8100 \text{ (焦耳)}$$

利用计算出的 $W_R$ 和 $t_0$ , 代入(7)式求 $P_R$ :

$$P_R = \frac{8100}{0.56} = 14464.28 \text{ (瓦)}$$

将已知的 $U_0$ 及R, 代入(5)式求 $P_{Rmax}$ :

$$P_{Rmax} = \frac{(45 \times 10^3)^2}{10 \times 10^3} = 202500 \text{ (瓦)}$$

根据(8)式, 吸能电阻的功率容量必须大于14464.3瓦, 而等于或小于202500瓦。

### 四、吸能电阻的有关设计

水电阻易做到高阻值和大功率容量, 所以用水电阻作吸能电阻较为适宜。

在上述计算实例中, 满足阻值为 $10 \times 10^3$ 欧和功率容量近似为202500瓦的吸能电阻, 一般只能用水电阻实现。水电阻的溶液采用硫酸铜水溶液, 水电阻的阻值取决于水电阻的尺寸及所含硫酸铜的浓度。

确定水电阻的长度时, 必须考虑耐高电压问题。确定水电阻的横截面积时, 要根据 $I_{Rmax} = U_0/R$ 式计算最大电流, 从而选择合适的最大电流密度, 防止水电阻局部过热汽化, 也就是说水电阻的横截面积不宜过小。

当水电阻的尺寸确定后, 可通过改变硫酸铜浓度满足阻值要求。

用内径5厘米, 长30厘米的有机玻璃管及圆饼状铜电极制成的水电阻, 通过改变硫酸铜浓度, 可使阻值最终达到约 $10 \times 10^3$ 欧。经下列计算表明, 这个水电阻可以满足使用要求。

水电阻的容积 =  $\pi \times (2.5)^2 \times 30 = 589.1$  厘米<sup>3</sup>

硫酸铜水溶液的比重近似以 1 克/厘米<sup>3</sup> 计, 则

水电阻的水溶液质量 = 1 克/厘米<sup>3</sup>  $\times 589.1$  厘米<sup>3</sup> = 589.1 克

水的比热 = 4.19 焦耳/克·度<sup>[4]</sup>, 硫酸铜水溶液的比热近似以水的比热计, 则

水电阻的水溶液温度升高 1 度所需的焦耳数 = 4.19 焦耳/克·度  $\times 589.1$  克  $\times 1$  度 = 2468.1 焦耳

根据已计算出的  $W_R = 8100$  焦耳, 表明水电阻实际吸收的总能量为 8100 焦耳, 则

水电阻的温升 =  $\frac{8100 \text{ 焦耳}}{2468.1 \text{ 焦耳/度}} = 3.28$  度

为确保使用安全, 我们不妨再作如下计算: 假设在 0~1<sub>0</sub> 时间内, 即在 0~0.56 秒内, 吸能电阻吸收的平均功率为  $P_{Rmax}$ , 即 202500 瓦, 计算此时水电阻的温升。

水电阻吸收的总能量 = 202500 瓦  $\times 0.56$  秒 = 113400 焦耳。

已计算出水电阻的水溶液温度升高 1 度需 2468.1 焦耳,

所以在上述假设条件下, 水电阻的温升 =  $\frac{113400 \text{ 焦耳}}{2468.1 \text{ 焦耳/度}} = 45.95$  度  $< 100$  度。

因此, 这个水电阻能承受的最大瞬时功率, 即 202500 瓦的初始瞬时功率。

综上所述可以得出结论: 这个水电阻在给定条件下作吸能电阻是安全的。

当然合乎上述要求的水电阻的尺寸不是唯一的, 这不仅与硫酸铜的浓度有关, 而且在一定程度上也取决于手边现有的器材。

为了保证吸能电阻的安全使用, 硫酸铜水电阻经多次放电后, 对其液面高度及阻值应进行检查, 还应检查接地的可靠性。

### 参 考 文 献

[1] 清华大学电力系高电压技术专业, 冲击大电流技术, 科学出版社, 1978 年出版, 第 188 页。

[2] 上海铁道学院电工原理编写组, 电工原理, 人民铁道出版社, 1979 年出版, 第 341 页。

[3] 洪浦, 电子学通讯, 1981 年, 第 3 期, 第 1 页。

[4] H.И.柯西金, M.Г.谢尔盖维奇, 基础物理学手册, 1980 年出版, 第 78 页。