

电爆炸切断开关的实验研究*

李永忠 张建德 张学书 彭向阳 陈东群

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

摘要 电感储能系统中的关键技术是切断开关技术, 本文论述了导体的电爆炸机制, 以及作为切断开关爆炸导体参数选取的经验公式, 并设计了一种爆炸导体切断开关的装置结构, 在实验中取得了较好的结果。通过调节导体参数, 可得到脉宽 280ns, 电压增益达到十几倍的高功率脉冲信号, 其结果对我们通过用虚阴极二极管等器件作负载来产生高功率微波有重要的意义。

关键词 电感储能, 切断开关, 爆炸导体, 脉冲功率

分类号 O59

Experiment Study of Electrically Exploded Opening Switch

Li Yongzhong Zhang Jiande Zhang Xueshu

Peng Xiangyang Chen Dongqun

(Department of Applied Physics, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract Opening switch technology is the key to inductive storage system. In this paper, the mechanism of conductor's electrically exploding is discussed. The experience formula is presented to determine the parameters of the electrically exploded conductor as an opening switch. And the configuration of such an opening switch is designed. Good results have been achieved in experiment. By the adjusting of conductor parameters, high-power pulse signals are generated with the duration of 280ns and the voltage gain of several tens. It is showed that this kind of opening switch can play an important role in high power microwave generation with such device as vircator used as the load.

Key words inductive storage, opening switch, electrically exploded conductor, pulse power

由于电感储能装置体积小、成本低, 因而在高功率脉冲技术等现代科技领域中有极其重要的作用^[1]。基本的电感储能装置包括充电电容 C 、储能电感 L_s 、转换装置(含切断开关 S 和闭合开关 K)、负载 Z_L 。就其实质而言, 这种装置是把 L_s 内建立的电流以脉冲形式传给负载, 从而使负载获得比用充电电源直接馈电给负载时高得多的功率, 而其中的关键技术就是要切断开关快速断路。所谓切断开关断路, 就是快速增加开关的阻抗, 迫使电流向负载转换, 同时它还在负载两端产生很高的感应电压 $L_s di/dt$, 压缩能量, 使负载获得脉冲功率。

切断开关取决于负载阻抗和负载脉冲的要求以及所用的转换电路, 而转换电路所用的切断开关的类型一般分为两类: 直接截流切断开关和电流过零或抵消脉冲切断开关。其中直接截流切断开关是通过迅速增加内部阻抗迫使电流换路, 这种开关应具备的主要条件是: 电流经过它充电和储能时, 它的阻抗应尽可能低; 它能

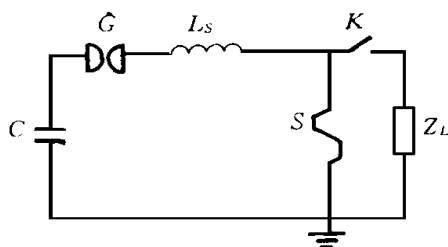


图1 电感储能系统的基本电路图

C —电容器组 G —触发开关 L_s —储能电感
 S —切断开关 K —随化开关 Z_L —负载

* 1998年2月27日收稿

第一作者: 李永忠, 男, 1968年生, 讲师

经历一个大的阻抗变化以及能承受住由于阻抗变化而产生的高电压。阻抗增大迫使电流换路至负载,但由于开关存在损耗,负载电流显然要小于充电电流。负载电压上升时间直接由开关阻抗上升速率来决定。

本文将研究一种电阻性转换电路——电爆炸导体切断开关。

1 电爆炸导体切断开关原理

由于爆炸导体(丝或箔)切断开关具有成本低,简单易造,断开时间短,传导时间可由导体材料、尺寸、周围介质所控制,以及断流能力强等优点,因此得到广泛的关注。特别是近年来,脉冲功率技术的发展,使爆炸导体切断开关的研究又出现新的高潮。

所谓电爆炸导体,就是向导体输入电流,通过电阻产生热量,使导体在极短的时间内完成固-液-气-等离子体四态的相转变。其过程伴有光、冲击波、电磁辐射和电阻剧增等物理现象。而其中电阻增长出现在汽化开始阶段,在这期间导体形成具有高压力的蒸气柱,稠密的蒸气阻滞自由电子沿电场运动,出现高电阻值,切断电流,完成电爆炸断路任务。

当蒸气通道开始膨胀,其内压力降低和密度减小或形成等离子体时,蒸气导体可能恢复导电。我们把从截流开始直到恢复导电的这段时间称为暂停时间,也就是开关断路时间。导体材料、周围介质,导体内的电流密度和持续时间,对恢复导电均有影响^[1]。

只有当向导体输入的能量大于或等于导体汽化所需要的能量时,导体才会发生爆炸,否则导体会像普通保险丝那样熔化。

导体爆炸呈现高阻值时,在它两端有电路赋予的高电压,容易沿导体表面发生击穿,因此导体过短将会出现沿面放电而不能截流,同时由于箔存在边沿效应,采用圆截面的导体会有的效果。

若将导体置于液体介质或高压气体中,能延缓蒸发物的膨胀,增大导体电阻率,提高沿面击穿场强,比在空气中爆炸有更好的电绝缘性能。

在相同导体横截面面积情况下,采用多根细导体并联比用单根导体的效果好得多。

2 爆炸导体参数的选择

由于许多研究爆炸导体特性的数学尝试都得不到实用的结果,人们就用试验和相似理论经验地总结出描述导体参数和电路参量关系的方程组^[3]

$$\epsilon = U_0^2 C l (n^2 d^4 Z) \quad (1)$$

$$\lambda = l / (n d^2 Z) \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\epsilon}{L_s C l d} \quad (3)$$

上述各式中, Z 是回路的特性阻抗, $Z = (L_s / C)^{1/2}$,单位 Ω ; d 是单根爆炸导体的直径,单位mm; l 是导体长度,单位mm; U_0 是电容器 C 的充电电压,单位kV; C 的单位是 μF ; L_s 的单位为 μH ; ϵ 是表征与输入导体能量相关的量,单位 $\text{J} \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{mm}^{-4}$; λ 是表征与长度相关的量,单位 $\Omega^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$; γ 是表征与爆炸时间相关的量,单位 $\mu\text{s} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

导体长度 l 决定能否彻底截流。当 l 较小时,感应电压会造成沿面放电,达不到截流目的;当 l 较大时,又将增加回路电感和装置尺寸,所以需适当选择长度 l 。把刚能出现截流状态时的长度定义为“临界长度” l_k ,显然只有当 $l > l_k$ 时,才能保证彻底截断电流。此时有^[3]

$$\lambda_k = 1.35 \times 10^3 (10^{-6} \epsilon \gamma)^{0.36} \quad (4)$$

我们的目的是在给定 U_0 、 C 和 L_s 后确定导体参数 d 、 l 和 n 。显然上述方程是不够的。但在现有的条件下,我们常常先给出导体的直径 d ,这样就可以确定导体的长度 l 和根数 n 了。

3 爆炸导体实验

实验均使用电阻分压器测电压,用罗柯夫斯基线圈测电流,用HP54502A数字示波器记录波形。

本电感储能装置中, 电容器电容 $C = 2.5\mu\text{F}$, 电感 $L_s = 7\mu\text{H}$, 充电电压 $U_0 = 30 \sim 50\text{kV}$, 电容器储能 $W_0 = \frac{1}{2}CU_0^2 = 1.1 \sim 3.1\text{kJ}$. 电爆炸导体是由根数 n 根细铜丝并联而成, 长度可调节, 用一绝缘圆筒将其封闭, 圆筒内可充高压气体. 其结构如图 2 所示.

不同性质负载的电感储能系统, 其设计考虑不尽相同. 这里主要涉及开路时的情况. 研究中对各种导体参数进行了实验, 限于篇幅, 仅给出下列一组不接负载, 开路状态时取不同参数所得到的爆炸导体两端的电压和电流数据, 如表 1 所示.

图 3 和图 4 是在充电电压 $U_0 = 35\text{kV}$, 导体参数 $l = 500\text{mm}$, $n = 30$ 根时的典型实验波形.

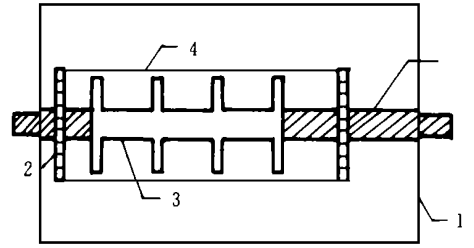


图 2 爆炸导体装置结构图

1—绝缘圆筒 2—活动圆铜板
3—绝缘支杆 4—爆炸铜丝 5—连接铜杆

表 1

参数	$n/$ 根	$l/$ mm	$d/$ mm	$P/$ 大气压	$I/$ kA	$U/$ kV
1	30	50	0.05	4	14	397
2	5	50	0.12	4	12	170
3	30	40	0.05	4	13	240
4	30	60	0.05	4	14.7	300
5	30	50	0.05	1	14	325
6	25	50	0.05	4	12.5	260
7	33	50	0.05	4	14.5	330

注: 表中 n, l, d 是爆炸导体参数; P 是爆炸圆筒的充气气压, 填充气体为氮气; U 和 I 分别是爆炸导体切断时, 爆炸圆筒两端的电压和电流值。

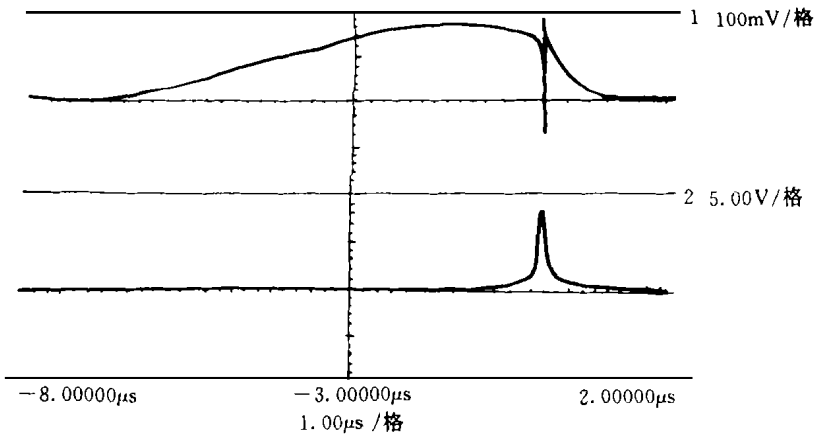


图 3 不接负载, 爆炸导体切断时两端的电压和电流示波图

4 结语

实验中为了保证实验安全可靠地进行, 对每个环节及测量器件如电阻分压器和罗柯夫斯基线圈进行了认真的标定和校验, 同时考虑本实验中的高电压、大电流、强干扰等现象, 对绝缘、布线、接地和屏蔽等因素作了仔细的分析, 因此实验是稳定可靠的。

所得结果表明爆炸导体断路所产生的感应电压, 很明显地与导体的几何参数、周围介质等有关. 根据需要, 可以在不改变系统主要元器件的情况下, 只改变爆炸导体的几何参数, 在一定范围内调节电

压输出。由于导体爆炸的机制很复杂, 因而描述导体参量和电路参量关系的方程式也不尽相同, 对导体参数的选取仍然以试验为准进行调整。我们在实验中, 当电路参数 $C = 2.5\mu\text{F}$, $L_s = 7\mu\text{H}$, 充电电压 $U_0 = 35\text{kV}$ 时, 爆炸导体参数选取 $l = 500\text{mm}$, $n = 30$ 根, 可得到电压 $U = 397\text{kV}$, 脉宽 280ns 的脉冲信号, 电压增益为 11 倍。其结果显示导体参数的选取基本上满足方程组 (1) ~ (3) 式所描述的关系式, 这对我们今后的实验具有很好的指导作用。

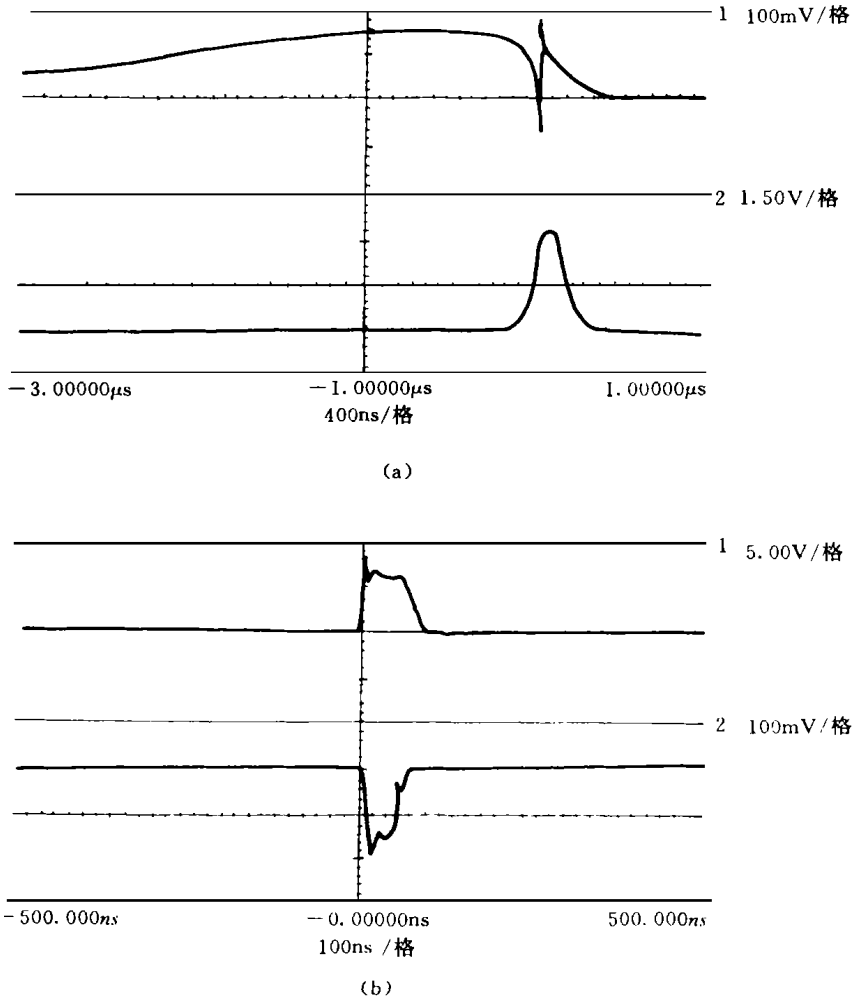


图 4 接虚阴极二极管作负载, 所测实验波形

(a) 爆炸导体两端的电压和电流示波图 $U_1 = 427\text{kV}$, $I = 14\text{kA}$

化开关 K 击穿后加在负载上的电压和负载产生的微波信号波形 $U_2 = 280\text{kV}$, 微波功率 $P = 10\text{MW}$

对于爆炸导体开关, 我们采用的是直线状的形式。这种形式结构简单, 但受导体长度的影响, 可能会过长而笨重, 因此可以考虑做成曲别针式的无感型, 既减小了电感, 也有利于减小体积, 使整个系统结构小型化。另外实验中可见闭合开关 K 的好坏, 对加到负载上的电压有很大的影响, 也就是说直接影响储能电感的能量转换效率。导体电爆炸过程是一个复杂的机制, 对它的认识尚未完臻。对此, 我们将在理论和实验两个方面作进一步的研究。

参考文献

- 1 米夏兹 Г А. 大功率毫微秒脉冲的产生. 原子能出版社, 1988
- 2 张仁豫. 高电压试验技术. 北京: 清华大学出版社, 1982
- 3 王莹. 电感储能和爆炸导体转换大功率毫微秒脉冲发生器. 电工电能新技术, 1985, 1