文章编号:1001-1609(2004)03-0189-02

爆磁压缩发生器冲击高电压的测量

曹胜光, 陈冬群, 刘永贵, 张建德, 钟辉煌

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

Pulsed High Voltage Measurement of the Explosively-driven Magnetic Flux Compression Generator

CAO Sheng-guang, CHEN Dong-qun, LIU Yong-gui, ZHANG Jian-de, ZHONG Hui-huang

(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

摘要: 爆磁压缩发生器的负载一般没有良好的接地点,且远离测试仪器。笔者介绍了用双电阻分压器测量其负载冲击高电压的方法。该方法简单可靠,可以应用于没有良好接地和复杂危险环境下的冲击高电压的测量。

关键词: 爆磁压缩发生器; 高电压测量; 电阻分压器

中图分类号: TM835.1 **文献标识码**: A

Abstract: Measuring pulsed high voltages at remote sites, where explosively-driven magnetic flux compression generators are normally tested due to safety consideration, exhibits a big difficulty because there is not good grounding points and shielding available. This paper uses double voltage dividers to resolve the problem.

Key words: explosively-driven magnetic flux compression generator(EMCG); high voltage measurement; resistance divider

1 引言

爆磁压缩发生器是利用炸药爆炸推动电枢压缩磁通,从而将化学能转变为电磁能的脉冲功率装置。目前其功率输出水平已达 10^{12} W 量级,能长时间(1 μs~1 ms)输出兆安级的大电流和兆伏级的高电压,在军事和科学研究中有广泛的用途[1]。由于炸药的破坏性和应用的特殊性,该装置常常只能在不接地或简单接地的情况下置于野外或爆炸室中运行。该装置属于一次性设备,用传统的分压器方法进行测量有可能损坏设备或者对测量信号干扰很大,如何安全准确可靠地测量其产生的脉冲高电压成为一个难题。

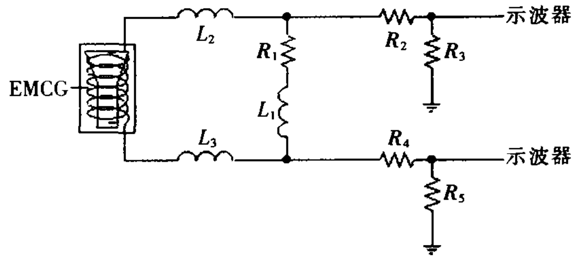
爆磁压缩发生器的负载一般为微亨或毫欧量级,如电爆金属丝,空心变压器等。这些负载的特点是其阻抗在高电压大电流的作用过程中会发生十分复杂的变化,这就决定了不能用直接测电流的方法来反推电压。同时也说明测量负载电压是研究负载特性的重要依据。

所研制的爆磁压缩发生器在空心变压器的原边(开路电感为 4 μH)输出的电压约为 60 kV,上升前沿约为 10 μs,脉宽 15 μs。

利用磁光效应、电光效应(克尔效应)、光电变换等光学方法能较好地解决这个问题。双电阻分压器方法比较简单可靠,基本上可满足实验室爆磁压缩装置研究工作的测量要求。

2 双电阻分压器方法

电阻分压器结构简单,一般由高电阻率的金属丝或液体做成。用一个电阻分压器测量电压时,分压器的高压臂和低压臂都必须分别接入负载的两端,这样就要求负载要有一个良好的接地;否则地电位升高会通过测量电缆损坏示波器或者严重干扰测量波形。双电阻分压器测量就是利用两个分压器同时测量负载的高压臂和低压臂相对于示波器接地点的电位波形,然后用示波器的波形相减功能处理后得到负载电压波形。其原理示意见图1。



EMCG——爆磁压缩发生器 L_2,L_3——装置到负载连线的分布电感 R_1,L_1——空心变压器的等效电阻和电感 R_2,R_3——第1个分压器的高、低压臂电阻 R_4,R_5——第2个分压器的高、低压臂电阻

图1 双电阻分压器测量爆磁压缩发生器的高电压

由于 R_2 和 R_4 具有较大的数值,从负载流过分压器到仪器地的电流而引起的地电位抬高较小,大大提高了测量的安全性和准确性。

收稿日期:2003-12-27; 修回日期:2004-02-08

由于被测信号为单脉冲,上升前沿大于 1 μs,幅值小于 100 kV,制作的电阻分压器见图 2[2]。

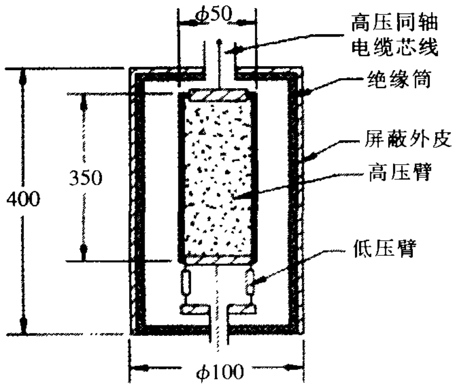


图 2 电阻分压器

图 2 中:高压同轴电缆芯线用来引接被测电位;绝缘筒用于防止高压对地放电;屏蔽外皮内径 D=100 mm,长 l=400 mm;高压臂由有机玻璃筒(筒径 d=50 mm,长 350 mm)内装硫酸铜水溶液制作而成,电阻为 20 kΩ;低压臂由 10 个金属膜电阻并联而成,阻值为 50 Ω。金属膜电阻并联成环状,输出引线从轴线引出,类似于分流器的设计,可以减小电感,阻值为 50 Ω,有利于与电缆波阻抗匹配。

该同轴分压器的电阻体与屏蔽外皮可以等效成一个同轴电缆来估算其分布电感 L_g 和分布电容 C_g,取 $\varepsilon_r=1$,$\mu_r=1$,则:

$$L_g=\frac{l\mu_0\mu_r}{2\pi}\ln\frac{D}{d}=\frac{0.4\times4\pi\times10^{-7}\times1}{2\pi}\ln\frac{0.1}{0.05}=0.055(\mu\text{H})$$

$$C_g=\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln\frac{D}{d}}=\frac{2\pi\times8.9\times10^{-12}\times1\times0.4}{\ln\frac{0.1}{0.05}}=32.3(\text{pF})$$

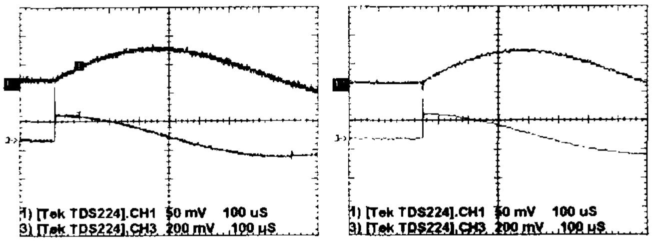
设计电阻分压器应满足两个条件。

一是电感 L_g 要足够小。因为电感具有阻碍电流变化的作用,当加上电压后,分压器回路中的电流不能突变,它将按指数变化规律上升,L_g/R 越大,波形畸变也越大,一般要求 $L_g/R<t_r/20$ (t_r 为被测波形的上升前沿)。笔者所设计的分压器 $L_g/R<<t_r/20$。

另一是电阻元件和接地屏蔽之间电容 C_g 的影响。当加上电压后,就有电流流过这些电容,也就是说电容起了分流作用。经分析可知,设计分压器时应满足 $0.23C_gR<t_r$,由于 $C_g=32.3\times10^{-12}$ F,R =20.05 kΩ;则 $t_r=1\times10^{-6}$ s 。显然:$0.23C_gR=0.15\times10^{-6}\text{ s} < 1\times10^{-6}\text{ s}$。

分压器的分压比为:$R_2/(R_2+R_1)=\frac{50}{20\,000+50}\approx$ 1/401 。当被测电压的最大值加在分压器上时,低压臂电阻的输出信号约为 150 V,可在示波器前加一个高阻抗的 10:1 衰减器。分压器的标定一般采用标准信号源,分别评估其方波响应和频率响应。

为验证测试的可行性,主要是考虑接地对测试的影响,具体验证过程如下:采用图 1 的测试电路,电容器对爆磁压缩发生器及其负载-脉冲变压器的原边构成的回路放电,测量负载电压。分两种情况:①R_5 和 R_3 分别接地,测得的电压波形见图 3(a);②R_5 和 R_3 短接后接地,测得的电压波形见图 3(b);其余放电过程一样。



(a)分别接地 (b)短接后接地

图 3 电压波形图

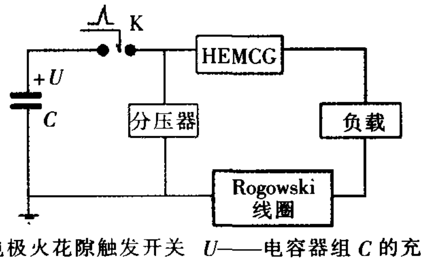
图 3(a),(b)中,3 通道测得的波形均为电压波形。图 3(a)中电压幅度为 185 mV,计算得出负载电压为 5.55 kV;图 3(b)中电压幅度为 180 mV,计算得出负载电压为 5.4 kV;两者相差 0.15 kV,测试误差不到 3%。由此可见接地对测试结果影响较小,该测试方法可行,并能满足测量要求。

3 爆磁压缩发生器冲击高电压的测量

爆磁压缩发生器的测试由静态试验测试和动态试验测试两部分组成。静态试验主要是测试爆磁压缩发生器的参数与特性,全面检验装置的特性参数和各种性能,同时还可以检验电容器充放电系统和试验测试系统的可靠性。动态试验测试主要是测量爆磁压缩发生器利用炸药爆炸所输出到负载的电流和电压。

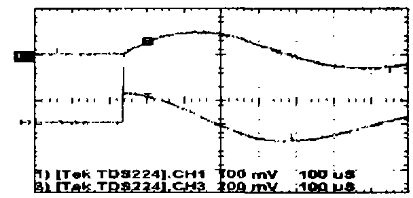
(1)爆磁压缩发生器静态高电压测量的原理见图 4。电阻分压器用来测量放电电压;Rogowski 线圈[3]用来测量螺线管型爆磁压缩发生器的静态电流。试验时,电容器组 C=220 μF,充电 U_0=6 kV。

电容器放电后,测得的电流和电压波形见图 5。



K——三电极火花隙触发开关 U——电容器组 C 的充电电压
HEMCG——螺线管爆磁压缩发生器

图 4 爆磁压缩发生器静态试验示意图



通道1——电流波形 通道3——电压波形

图 5 爆磁压缩发生器静态试验测试电流和电压波形

(下转第 194 页)

进行，从而获得没有缺陷的铜铬结晶组织。

熔炼电流的大小对铜铬铸锭组织的影响是很大的。熔炼电流过小，熔池的温度太低，铜铬熔液混熔不充分，而且可能有少量的铬得不到完全熔化，导致铜铬铸锭组织结晶不均匀，甚至存在原始的铬粉颗粒，见图 6。熔炼电流过大，熔池的温度过高，熔炼速度太快，如果冷却速度得不到相应提高，铜铬熔液不能及时冷凝结晶，铬晶粒长大，在铜铬铸锭的组织中形成较粗大的、树枝状铬晶粒和孔洞、偏析等缺陷，见图 7。

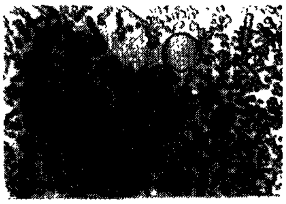


图 6 电弧熔炼铜铬中原始的铬粉颗粒（100×）

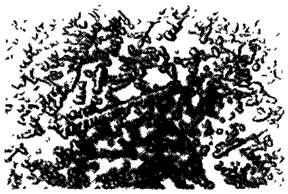


图 7 电弧熔炼铜铬中的铬树枝状铬晶粒（100×）

冷却条件与电弧稳定性、熔炼电流一样，是影响铜铬铸锭组织最重要的工艺因素之一，提高冷却能力对改善和优化铜铬铸锭组织、细化铜铬晶粒的效果是非常显著和至关重要的。真空电弧熔炼铜铬触头材料通常采用水冷的方式，提高水流速度，进而提高传热速度，对提高冷却能力是有效的。

5 结语

真空电弧熔炼工艺制造的铜铬触头材料具有铬在铜中呈细小弥散均匀分布的结晶组织，铬颗粒平均粒度为 10～20 μm，其开断能力、抗熔焊性、介质恢复强度等电气性能均明显优于用传统粉末冶金方法制造的铜铬触头材料。

真空电弧熔炼工艺制造的铜铬材料不仅可以用作中压真空断路器触头，还可以用作低压真空断路器触头。

参考文献：

[1] R Muller. Arc-melted CuCr Alloys as Contact Materials for Vacuum Interrupters [J]. Siemens Forsch.-u Entwickl. -Ber. Bd., 1988, 17(3): 105-111.

[2] H Kippenberg. Copper-chromium Contact Materials for Vacuum Circuit Breaker [A]. Proceedings of the 13th International Conference on Electric Contacts [C], Lausanne, Switzerland, 1986.

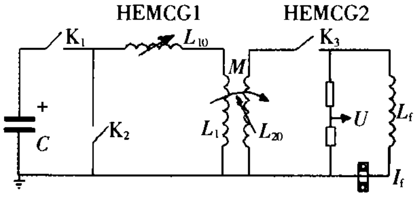
[3] 丁秉钧.显微组织对 CuCr 真空触头材料耐电压强度的影响[J]. 电工合金，1998(3)：11-16.

[4] 修士新. CuCr 触头材料微观特性对其宏观性能的影响[J]. 高压电器，2000，36(3)：40-42.

作者简介：梁永和（1954-），男，教授级高工，主要从事电工合金技术方面的研究工作。

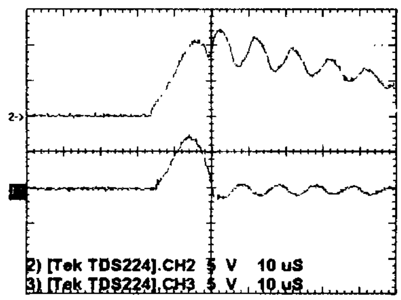
（上接第 190 页）

（2）爆磁压缩发生器动态高电压测量的原理见图 6。试验时，电容器组 C=220 μF，充电 U_0=6 kV，L_f=3.8 μH，测量的电压和电流波形见图 7。



$L_{10}+L_1$——第 1 级 HEMCG1 的总电感 L_{20}——第 2 级 HEMCG2 的总电感 L_f——HEMCG2 的负载 K_1——电容器组放电的炸药爆炸接通开关 K_2，K_3——HEMCG1，HEMCG2 的撬断开关 I_{10}——HEMCG1 的初始电流 M——HEMCG1 和 HEMCG2 的互感 I_f——负载电流测量 U——负载电压

图 6 爆磁压缩发生器动态试验测试示意图



通道2——电流波形 通道3——电压波形

图 7 爆磁压缩发生器动态试验测试电流和电压波形

由图 7 可看出：u=di/dt，所测电压波形与电流波形符合微分关系；波形光滑、无毛刺或大的突变；所测电压与电容器充电电压基本一致，说明分压器工作可靠、测量准确。

4 结论

爆磁压缩发生器的负载电压测量需要较长的信号线，且负载本身没有良好的接地。上述两种方法具有高输出阻抗的特点，且较好地解决了接地不良而引起的地干扰和破坏，满足了实验要求。由于爆磁压缩发生器造价较高，且只能一次运行，在实际实验中，同时运用两种方法进行测量可进一步提高测量的可靠性和准确性。

参考文献：

[1] 王 莹. 高功率脉冲电源[M]. 北京：原子能出版社，1991.

[2] 杨津基. 冲击大电流技术[M]. 北京：科学出版社，1981.

[3] 揭秉信. 大电流测量[M]. 北京：机械工业出版社，1987.

作者简介：曹胜光（1970-），男，硕士，从事脉冲功率技术研究。