

# 爆炸开关系统的研制

宋执权, 傅 鹏

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

## Development on Explosive Breaker System

SONG Zhi-quan, FU Peng

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**摘要:** 为了研制托卡马克核聚变装置中的大功率抽超后备保护开关,介绍了一种爆炸断路器系统的基本结构及其工作原理,给出了爆炸断路器设计的原则。通过理论和实验两方面相结合的方法,分析了断路器系统的开断特性和换流特性。实验表明,该爆炸断路器系统满足超导磁体失超后备保护开关系统的要求,将被应用于托卡马克核聚变装置中。

**关键词:** 爆炸开关; 结构; 换流; 开断

**中图分类号:** TM561

**文献标识码:** A

**Abstract:** In order to study and manufacture a large power backup quenching protection breaker in the Tokamak device, this paper introduces the configuration and the operation principle of a special explosive breaker system, and gives its design principle. The interruption and commutating current characteristics are analyzed by ways of combining theory and experiment. The result shows that this kind of breaker system meets the requirements of the quenching protection breaker system, which will be used in Tokamak device.

**Key words:** explosive breaker; structure; commutating current; interruption

## 1 引言

纵场与极向场电源系统是国家大科学工程全超导托卡马克核聚变实验装置系统中的重要组成部分,它通过向纵场与极向场超导磁体线圈供电,以实现等离子体的产生、约束、加热、平衡与控制。超导线圈的安全可靠运行对于装置的安全运行和物理实验成败,有至关重要的作用。装置正常运行时,超导磁体中储存着巨大的磁场能量,一旦超导磁体发生失超,储存其中的巨大能量必须立即转移释放出去,否则将会损坏超导磁体,造成不可估量的损失。因此如何将储存其中能量转移泄放来保护磁体对整个聚变

装置的安全运行非常重要。

笔者采用的是大功率直流开关系统开断流过失超磁体的大电流<sup>[1]</sup>,通过开关系统分断时产生高的电弧电压,将开断电流迅速换流到与开关并联的高阻抗负载中,使磁体中储存的能量在高阻抗负载中得到迅速释放,从而能有效的保护超导磁体。

承担着超导磁体失超后备保护的直流开关系统——爆炸开关系统是失超保护的最后一级保护,其核心器件由爆炸开关与熔断器组成。

## 2 开关系统的结构和工作原理

爆炸开关系统主要由爆炸开关、熔断器和双反并二极管组成,爆炸开关承载长期工作电流,而熔断器则用于开断电压来减轻爆炸开关断流的负担,并产生脉冲高压<sup>[2]</sup>。从而解决了开关的高热稳性、大电流开断和脉冲高电压的产生等问题。

爆炸开关是一种炸药驱动的机械开关,其优点在于结构简单、分断迅速、可靠性高等特点,它是通过引进、消化吸收外国产品的技术,专门研制作为失超后备保护的开关。

熔断器是采用配有撞击器的高压限流熔断器,其熔断后具有指示功能。它结构简单,在爆炸开关系统换流过程中起着重要的作用。

二极管的作用是开关正常运行时,限制主回路电流从熔断器上通过。下面分别介绍它们的结构和工作原理。

### 2.1 爆炸开关

爆炸开关主要由开关主体、触头系统和驱动机构等组成。开关的基本结构见图1。

由图1可以看出,上、下触头和上、下导电环组成了触头系统;驱动部分由雷管、炸药和上、下触头间的绝缘块构成,雷管和炸药位于绝缘块之间。

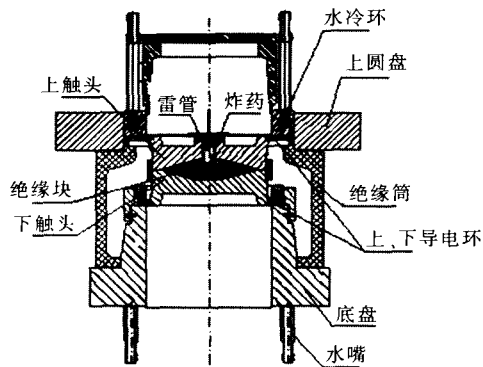


图1 爆炸开关基本结构示意图

爆炸开关通过自身的水冷却系统带走了在大电流运行时开关所产生的大部分热量,使整个开关内部的温度不超过炸药和雷管的安全不起爆温度,保证了开关的安全可靠工作。

爆炸开关基本工作原理是:当失超信号到达雷管触发装置时,雷管触发单元立刻发出起爆信号引爆雷管和炸药,在炸药爆炸产生的巨大爆轰压力下,绝缘块产生径向变形并迅速膨胀产生巨大推力使处于其上、下位置的两触头发生分离运动,分别迅速截断上、下导电环。触头分离过程中产生的电弧在巨大的爆轰波气流作用下很快熄灭,开断电流立刻由开关向与其并联的熔断器支路切换。

爆炸开关是单次设备,每次分断后,需要更换触头系统和驱动机构。

## 2.2 熔断器

在开关系统中,熔断器主要有两个作用:一是进行二次换流,通过人为地控制熔断时间来减轻主开关的灭弧负担,使其绝缘强度得到迅速恢复,而不致击穿主开关造成其重燃;其次是可以产生脉冲高压,使磁体中的能量迅速转移到高阻抗负载中得以释放。

高压限流熔断器的基本结构见图2,银熔体被绕在陶瓷做的星形柱骨架上,然后装入陶瓷外壳内,用石英砂填满整个管内。石英砂作为灭弧介质,能在熔体熔断时产生强烈的限流作用,它还具有冷却的功能可以加速介质恢复,另外它还能吸收部分电感储能。

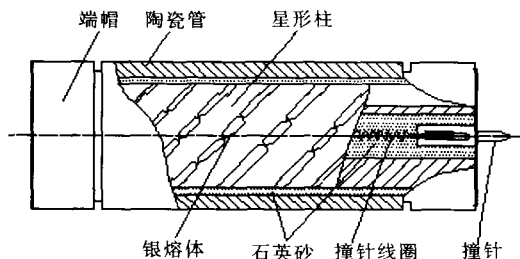


图2 熔断器基本结构图

熔断器是利用撞针来给出动作的标志,推动撞针的能量来自点火装置<sup>[3]</sup>。从图2中可以看出,它位于熔断器的端部并装有少量火药,从点火装置一端

引出引火线,引火线和电阻丝串联并与主熔体并联。当主熔体熔断后,全部电压加在熔断器两端,使得有足够大的电流通过引火线,加热引火线并引爆火药。产生的爆炸力使得撞针尖端穿出熔断器的端帽,从而作为熔断器动作的标志。

## 2.3 二极管

二极管的主要作用是利用其导通时所需要的门槛电压来阻断电流,使得熔断器在爆炸开关上流过电流正常工作时而没有电流从其通过,从而保护了熔断器在系统正常运行时,不致发热而熔断。

## 3 爆炸开关的设计

爆炸开关中的触头系统和驱动机构是关键部件,设计时应考虑以下因素。

(1)在设计触头系统时,应合理选择触头材料和导电截面的大小。

选择触头材料的原则是要保证触头的导电性好,触头间的接触电阻小等。

导电截面大小的选择是要满足在触头系统有水冷的情况下,开关正常运行时,触头系统温度不超过炸药和雷管的安全不起爆温度。

导电截面的选择分析如下,由能量守恒原理,触头系统达到热稳定的时间 $t$ 内,触头与周围介质间热量交换关系可用下式表示<sup>[4]</sup>:

$$I^2 R t = C_r \tau + c V t \Delta \tau \quad (1)$$

式中: $R$ 为触头电阻(触头自身电阻与触头间的接触电阻之和)( $\Omega$ ); $C_r$ 为触头热容量( $J/^\circ C$ ); $\Delta \tau$ 为水的温升( $^\circ C$ ); $\tau$ 为触头达到热稳定后的温升( $^\circ C$ ); $c$ 为水的比热( $J/L \cdot ^\circ C$ ); $V$ 为水的流量( $L/s$ )。

为了保证触头温升不超过雷管与炸药的安全不起爆温度,一般其温升应限制在 $20 \sim 30$   $^\circ C$ 范围之内。在触头温升和水流量大小确定的情况下,一段时间内消耗的热量是一定的,由式(1)可知,只要触头电阻的发热量不超过消耗的热量,触头的温升就能满足要求。

导电截面的大小直接影响到触头电阻的大小和发热,但触头间接触电阻计算很复杂,与触头材料、接触面积、接触压力和接触表面等都有很大关系。在设计和确定导电截面大小时需要理论计算与实验测量相结合才能确定。

(2)在设计开关驱动机构时,开关所需雷管和炸药量的选择是关键。

雷管和炸药是开关分断的原动力,是驱动机构中的重要组成部分。炸药选用特制的猛炸药黑索金,它具有爆炸威力大、爆轰速度高,经过钝化处理它还具有敏感度低,安全不起爆温度高等优点,是满足爆炸开关的理想炸药。炸药爆炸的爆轰压力 $P_0$ 可写为<sup>[5]</sup>:

$$P_D = \frac{1}{k+1} \rho_0 D^2 \quad (2)$$

式中： $\rho_0$ 为装药密度  $\text{kg/m}^3$ ； $P_D$ 为爆轰压力  $\text{Pa}$ ； $k$ 为爆轰产物的比热比； $D$ 为炸药爆轰速度  $\text{m/s}$ 。

由式(3)可知，开关能可靠分断所需药量与炸药自身特性和装药密度有关，此外，它还与开关的结构、绝缘块和触头材料的强度等有很大关系，具体药量需要通过理论计算和开关实际分断实验效果综合考虑加以确定。

由于爆炸开关使用在电磁干扰大的环境中，因此，雷管需采用特制的非电导爆管雷管，这种雷管不受电磁场影响，能安全可靠地工作。

此外，开关主体的设计首先应做到安全牢固，其次开关主体对载流体和地间应有足够的绝缘强度，因此开关主体应做成敞开式，避免爆炸后的冲击波使密闭的主体爆裂。

爆炸开关的设计是一个涉及电学、热学和爆炸力学等多个学科知识的综合应用，同时需要不断地通过实验来校核改进设计结构，只有理论与实验相结合，才能设计出一个满足实际需要的开关。

#### 4 开关系统的开断特性

为了分析开关系统的开断特性，对研制成功的爆炸开关系统做了一系列的开断实验，得出了一些有用的结论。首先研究爆炸开关开断感性电流的过程，具体实验电路见图3。

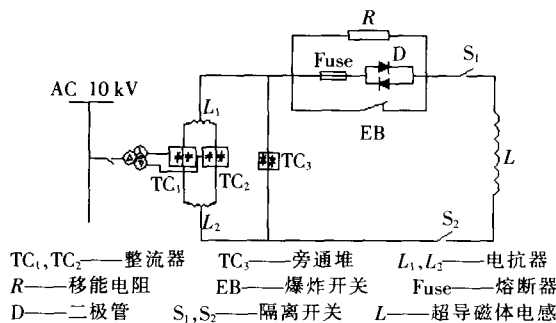


图3 磁体电源的电路原理图

图4为爆炸开关开断15kA电流时，在开关断口处所产生的电弧电压波形。从实验波形中可以看出，爆炸开关开断感性直流可以分为两个阶段。第1个阶段是从炸药爆炸瞬间开始，在爆炸冲击波的压力作用下绝缘块开始膨胀，最初膨胀过程较慢，触头被分开很短的距离，弧压上升速率较慢并维持一段时间。第2阶段是绝缘块迅速膨胀，使触头迅速分离，电弧电压以极快的速率上升，并很快维持在某一值燃烧，这一阶段电压值基本不变，直到开关支路的电流降到零为止，而在这段时间内电流是缓慢下降的。这种现象可以根据克西电弧理论来解释。电弧在燃烧时是圆柱形气体通道，其截面温度分布均匀，此电弧通道有相当明确的界限，即直径，在直径以外其

电导是相当小的。假使通过这电弧的电流发生变化，则其直径也同时变化，但温度不变，即认为电弧的温度在空间和时间上都是不变的。因此，能量和能量散出的速度与弧柱截面的变化成正比，能量的散发是弧柱变形所造成的，在燃弧时，电弧电压梯度保持为常数，即弧压近似地为一矩形波。在静态时电弧电压梯度  $E_0$  为<sup>[6]</sup>：

$$E_0 = \sqrt{\mu_c N_c}$$

式中： $\mu_c$ 为单位体积电弧的电阻常数； $N_c$ 为单位体积电弧的散发功率常数。

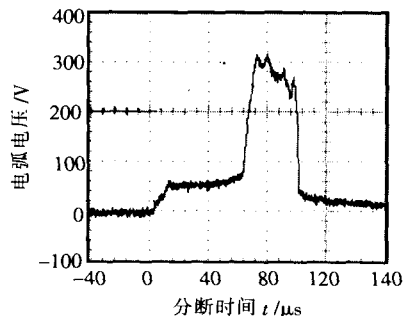
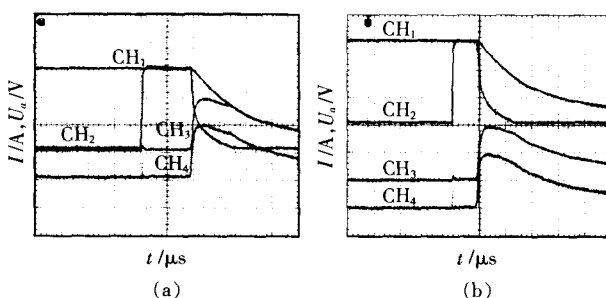


图4 爆炸开关分断时断口处弧压波形

从图4中还可以看出，爆炸开关的分断速度非常快，在约100  $\mu\text{s}$ 的时间内就可完全分断。在爆炸开关两端并联高压熔断器与双反并二极管串联的回路就构成了开关系统。通过改变熔断器的熔断参数，调节爆炸开关的绝缘恢复时间和恢复电压，对开关系统进行了几次成功的开断实验。

图5中(a)，(b)两波形图所示的分别是在不同熔断器的熔断参数下，爆炸开关开断15kA电流时，熔断器熔断后的弧压波形以及主回路、熔断器支路和高阻抗负载支路的电流波形。从这两个波形图中可以看出，爆炸开关断开后，在不同的熔断时间下，熔断器熔断时产生的恢复电压均低于爆炸开关的绝缘恢复电压，爆炸开关未被击穿，可见爆炸开关的绝缘强度恢复时间小于4ms，这时回路中的能量除一部分消耗在熔断器中，大部分能量都转移到高阻抗负载中消耗了，开关系统成功开断。

开关系统的开断特性在很大程度上决定于爆炸



注：CH<sub>1</sub>、CH<sub>2</sub>、CH<sub>3</sub>——分别为主回路电流、熔断器支路电流和高阻抗负载支路电流的波形，图中每一格代表实际电流2500A  
CH<sub>4</sub>——为熔断器熔断后的弧压波形，每一格代表实际电压500V。时间轴为每格4  $\mu\text{s}$ 。

图5 开关系统开断弧压和支路电流波形

开关开断后,电流向熔断器的换流过程<sup>[7]</sup>。这一过程可以分为两个阶段,第1阶段是爆炸开关的绝缘块在炸药爆轰波的巨大压力下迅速膨胀,在巨大的膨胀作用力下开关触头由闭合状态到完全分断的过程,亦即电弧的弧长增加过程,这个过程的时间就是开关的开断时间,其值为微秒量级;第2阶段就是爆炸开关触头开距保持不变,即弧长不变,电流逐渐转入熔断器的过程。两个阶段的时间之和就是爆炸开关电流从最大值降到零的时间,通常称为换流时间。换流时间愈短,开关断口中燃弧时释放的能量愈少,燃弧后开关断口中气体的介质强度恢复愈快,能承受的恢复电压愈高。所以在设计开关系统时,应该尽量缩短换流时间。

该爆炸开关最大换流时间小于 500  $\mu\text{s}$ ,与其关联的熔断器支路电阻应不大于 10  $\text{m}\Omega$ ,电感不大于 10  $\mu\text{H}$ 。要实现缩短换流时间,应尽量缩短换流回路,使爆炸开关和熔断器靠近,以减小杂散电感和电阻。

## 5 结语

该直流爆炸断路器系统额定工作电流可达

20 kA,额定电压 2 kV。虽然其每次动作后都需要更换某些部件,且开断时响声较大,但由于它能安全迅速地开断大电流,且具有可靠性高、成本相对较低和使用方便等特点,它即将使用在超导磁体电源系统作为失超后备保护开关。随着电感储能电源系统和电力系统大功率直流输电的不断发展,将会得到更广泛的应用。

## 参考文献:

- [1] 李天和(美). 大功率开关装置的物理基础与工程应用[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
- [2] 林 莘. 现代高压电器技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 王季梅. 高压交流熔断器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 清华大学高压教研组编. 高压断路器(上册)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978.
- [5] 李翼祺, 马素贞. 爆炸力学[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [6] 王其平. 电器电弧理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [7] 傅 鹏, 许家治, 汤广福. 开断感性直流 90 kA 开关系统的研制[J]. 高压电器, 1995, 31(6): 7-10.

(上接第 244 页)

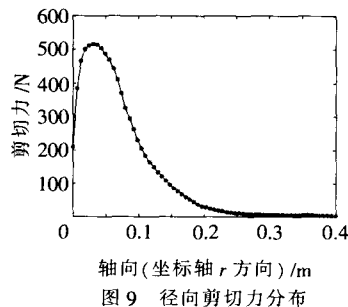


图9 径向剪切力分布

计算更加切合实际情况。

## 5 结语

本文在对 PHOENICS 软件进行二次编程的基础上,对所建立的电弧炉中电弧等离子体的数学模型进行了计算,给出了电弧炉中电弧等离子体的流场和温度场的分布情况,分析结果表明,文中的计算结果与已有文献中的测量结果吻合良好。同时,阳极处热量分布、电流密度分布和径向剪切力的计算结果可作为对熔池进行数值模拟的边界条件,从而为下一步的工作奠定基础。

## 参考文献:

- [1] M Ushio, J Szekely, C W Chang. A Mathematical Modeling of Flow Field and Heat Transfer in High-current Arc Discharge[J].

- Ironmaking and steelmaking, 1981, 6(1): 279-286.
- [2] J Szekely, J Mckelliget, M Choudhary. Heat Transfer Fluid Flow and Bath Circulation in Electric-arc Furnace and DC Plasma Furnaces [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1983, 10 (4): 169-179.
- [3] F Qian, B Farouk, R Mutharasan. Modeling of Fluid Flow and Heat Transfer in the Plasma Region of the DC Electric Arc Furnace [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1995, 26B(October): 1 057-1 067.
- [4] Wanping Hu, J D Lavers. Coupled Electro-thermal-flow Model for very Long Electric Arcs [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1997, 33(2): 1 726-1 729.
- [5] Jonas Alexis, Marco Ramirez, Gerardo Trapaga et al. Modeling of Heat Transfer from an Electric Arc-A Simulation of Heating Part I [A]. Proceedings of 56th Electric Furnace Conference[C], New Orleans, Louisiana, November 1998.
- [6] James C Morris, Gale R Bach, Rhoda U Krey, et al. Continuum Radiated Power for High-temperature Air and Its Components[J]. AIAA Journal, 1996, 4(7): 1 223-1 226.
- [7] 朱应波, 宋东亮, 曾昭生, 等. 直流电弧炉炼钢技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.
- [8] M Capitelli, G Colonna, C Gorse, et al. Transport Propertied of High Temperature Air in Local Thermodynamic Equilibrium [J]. Eur. Phys., J. D, 2000(11): 279-289.
- [9] B Bowman. Applied Physics, Measurements of Plasma Velocity Distributions in Free-burning DC Arcs up to 2 160 A[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1983(5): 1 422-1 432.