

## Spark - 05 加速器真空界面设计\*

杨汉武,王 勇,张建德,赵延宋

(国防科技大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要:**为了驱动中高阻抗的高功率微波源,建造了油介质 Blumlein 型加速器 Spark - 05,其真空绝缘子界面为设计的难点之一。为了减小体积和结构简单,确定了真空界面采用径向绝缘结构,利用静电场有限元程序计算了界面上的电场分布,通过调整均压环和屏蔽环的形状使电场分布更加均匀,真空界面上沿面场强和三结合点处场强均得到了有效的控制,在 1MV 实验中工作稳定。

**关键词:**真空绝缘,沿面闪络,Blumlein 形成线

中图分类号:TN015 文献标识码:A

## The Design of the Vacuum Interface of Spark - 05

YANG Han-wu, WANG Yong, ZHANG Jian-de, ZHAO Yan-song

(College of Optoelectric Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** Spark - 05 was built for conducting researches on medium/high impedance high power microwave sources. The interface between oil and vacuum was one of the keys to the system design. For reasons of compactness and simplicity, a disk type vacuum insulator was adapted. Electrostatic field along the insulator surface was calculated. By adjusting the position of the shielding rings, electric fields were well distributed, and the field around the triple junction was controlled. The insulator worked well in 1MV experiments afterwards.

**Key words:** vacuum insulation; surface flashover; Blumlein pulse forming line

强流相对论电子束加速器是高功率微波等研究的关键设备,笔者根据科研工作的需要,在原来的 Tesla 型加速器<sup>1</sup>的基础上,改建成 Spark - 05 强流粒子束加速器。图 1 给出了 Spark - 05 加速器的结构示意图。其主要由 Marx 发生器、油介质 Blumlein 型脉冲形成线和真空二极管三部分组成。设计在匹配负载上最大二极管输出电压 1.0MV,一般工作电压 800kV,半高宽度 35ns。设计的难点集中在位于加速器脉冲形成线和二极管连接处的真空界面绝缘。

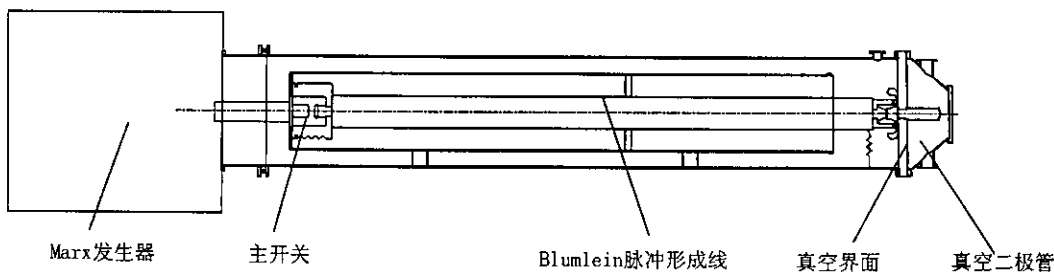


图 1 Spark - 05 加速器结构示意图

Fig.1 Structure of Spark - 05 accelerator

## 1 原真空界面的结构和分析

真空界面实际上包括变压器油、有机玻璃以及有机玻璃、真空两个界面。众所周知,界面沿面绝缘

\* 收稿日期 2005 - 04 - 10

作者简介 杨汉武(1974—),男,讲师,博士。

强度低于构成界面的任何一种单一介质的绝缘强度,特别真空界面闪络一般是加速器输出电压的瓶颈,因此需要特别予以重视。原来的真空界面结构如图2所示,其中底边线为对称轴。主要结构有阴极杆1,真空2,真空外壳3,有机玻璃绝缘板4,预脉冲开关电极5、8,预脉冲开关外壳6,变压器油7,Blumlein线内筒9和外筒10等。图2中同时给出了利用有限元方法在阴极电压为1MV、外壳接地时静电场等势线分布的计算结果,这时预脉冲开关已经导通,Blumlein线内筒、预脉冲开关电极和阴极杆处于等电势,图中相邻等势线间电势差为50kV。

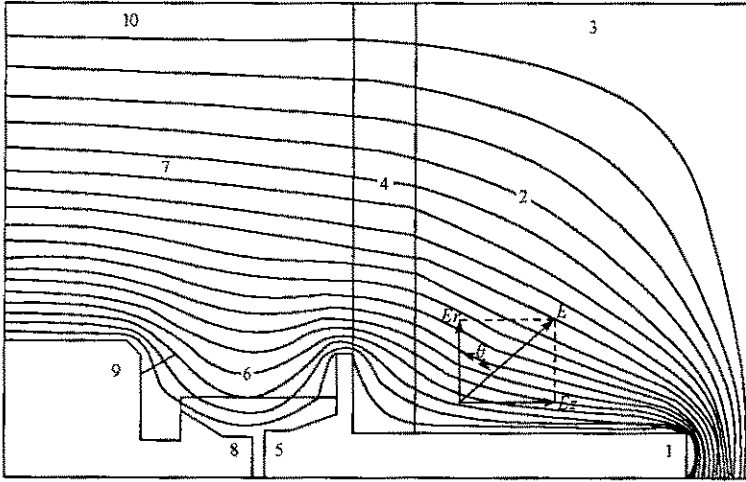


图2 原真空界面的结构及电场分布示意

Fig.2 Calculated electric field of original vacuum interface

根据真空闪络研究的结果<sup>[2]</sup>,当绝缘子两端施加电压时,金属电极、真空和绝缘材料表面三者结合处如果电场强度较高,将发生场致发射,产生一次电子,电子在电场的作用下加速,并撞击绝缘子表面,将从绝缘子表面产生二次电子,表面留下正电荷,增强了该区域的电场,并吸引电子轰击表面。这个过程不断继续,使表面吸引更多的电子,导致电子雪崩,同时大量的电子轰击使绝缘材料表面发生解吸,脱附的气体分子也可能被电子碰撞而发生电离,最终导致沿面闪络。

根据以上理论和其他研究成果,真空绝缘子的设计一般有以下原则:

- (1)尽可能降低三结合点处的电场,减少一次电子;
- (2)尽可能使电子运动时不轰击表面,减少二次电子和表面带电荷量,即图中的 $\theta$ 角度在 $45^\circ$ 最好;
- (3)采用均压环,利用电容均压使电场分布更均匀,并可屏蔽局部击穿的紫外照射。

于是在设计中采用均压环和 $45^\circ$ 锥角绝缘子在许多大型的强流加速器中得到了广泛应用<sup>[3,4]</sup>,并有经验公式可供设计参考<sup>[5]</sup>。对于固体介质和液体界面的闪络也有类似的原则,即也要减少三结合点处的场强和控制电场的分布。

通过分析图2可以看出原先的结构没有满足以上原则。尽管由于预脉冲开关电极的存在,使真空界面三结合点得到了一定的屏蔽,并使得电场线与有机玻璃表面呈现出有利绝缘的角度,但该处电场强度仍达到 $50 \sim 60 \text{ kV/cm}$ ,而一般设计在 $30 \text{ kV/cm}$ 左右。并且在有机玻璃和变压器油的界面处,预脉冲开关金属盖板外缘的局部场强达 $200 \text{ kV/cm}$ 以上,很容易造成在液、固界面发生闪络。

## 2 新设计的真空界面

文献<sup>[3,4]</sup>提到的采用多个 $45^\circ$ 绝缘体和均压环沿二极管轴向的绝缘结构能使电场分布比较均匀,绝缘效果很好,应用比较广泛,但其结构比较复杂,体积较大。故此为充分利用原来的材料,尽量节约成本,新设计仍然采用径向绝缘结构,但做了以下主要改变:

- (1)在固、液界面预脉冲开关外套一个均压屏蔽环;
- (2)在固、真空界面增一个三结合点屏蔽环结构;

(3) 利用锥台形的二极管外壳。通过调整以上两个均压环的形状,以尽可能地降低沿面场强。

图 3 给出了新结构示意图和阴极电压 1MV 时电场分布的计算结果。图 3 的中线为对称轴,左边为等场强线图,相邻灰度阶之间差距为 10kV/cm,颜色愈浅,场强愈大;右边为等势线图,相邻等势线间电势差为 50kV。

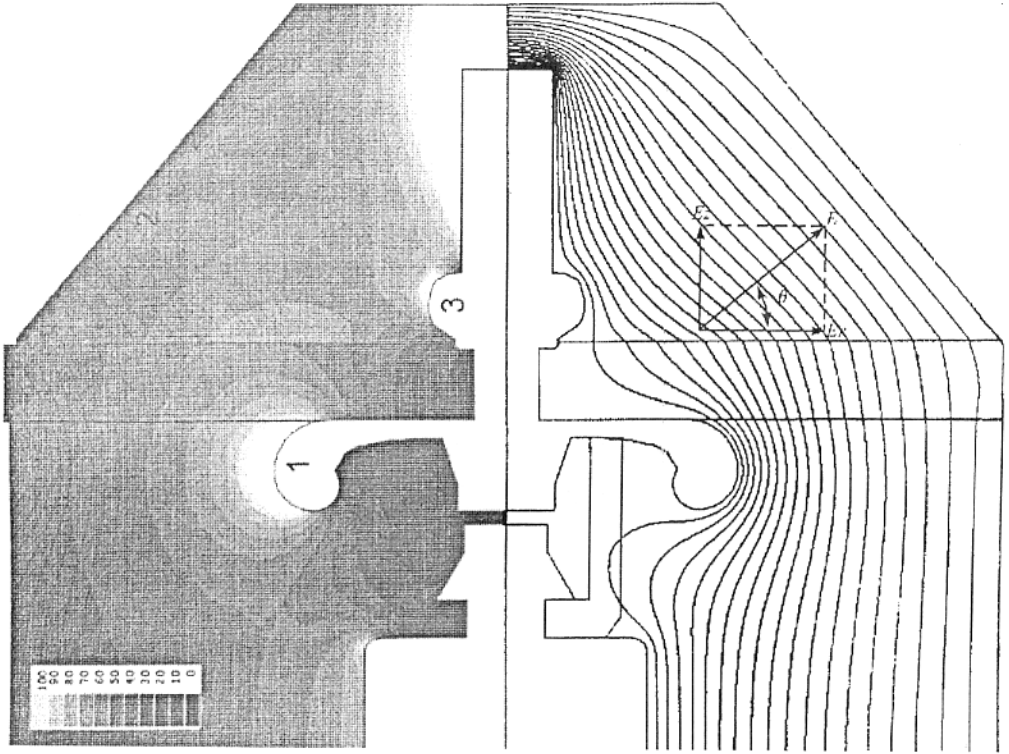


图 3 新设计真空界面的结构和计算得到的电场分布

Fig.3 Calculated electric field of new designed vacuum interface

由图 3 可见,以上改进达到的主要效果为:

(1) 电场线与绝缘体表面夹角  $\theta$  基本上成  $45^\circ$ ,图 4(b)中虚线给出了  $\theta$  沿有机玻璃表面的分布。

(2) 真空界面三结合点场强得到了有效控制,该区域内场强小于  $20\text{kV/cm}$ ,并且沿绝缘表面电场  $E_r$  起伏不大,比修改之前分布更加均匀。图 4(b)中实线给出了  $E_r$  的分布,在 1MV 电压下,场强沿面分量平均为  $30\text{kV/cm}$ ,最大为  $40\text{kV/cm}$ 。

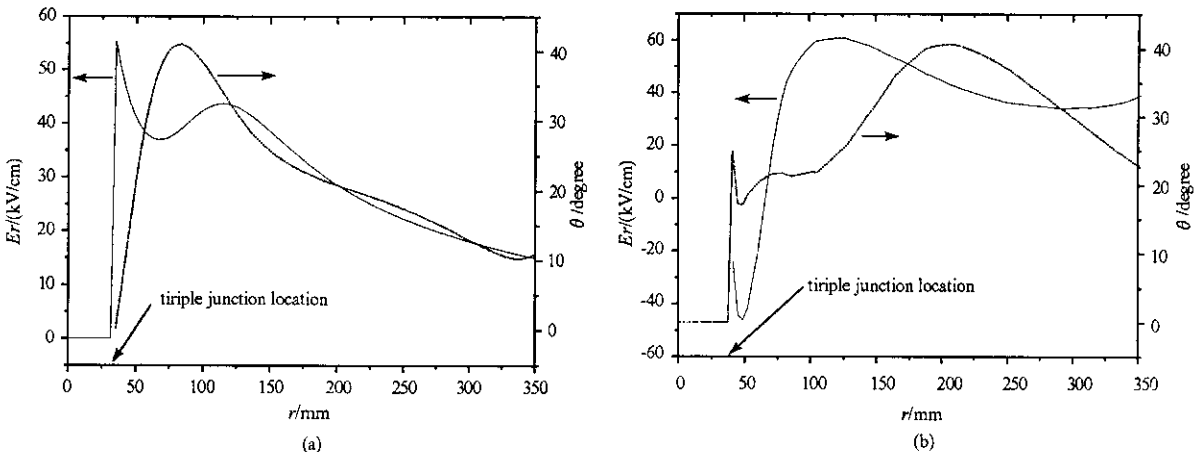


图 4 修改前(a)后(b)电场  $E_r$  分量和电场与表面的夹角  $\theta$  的分布

Fig.4 Electric field  $E_r$  and  $\theta$  along surface for original (a) and new (b) design

(3)有机玻璃和变压器油的界面三结合点场强也得到了有效控制,小于 120kV/cm,并且场强的最大值由原来靠近有机玻璃表面移到屏蔽环的最外缘,降低了固、液表面的闪络几率。

根据文献[5]中的真空闪络 Martin 公式,对 45°绝缘结构,在 50% 击穿概率条件下,绝缘表面最大场强不超过

$$E = \frac{175}{t_{eff}^{1/6} A^{1/0}} \quad (1)$$

其中,  $t_{eff}$  为场强超过 89% 最大场强的时间(单位为  $\mu s$ ),  $A$  为绝缘子的表面积(单位为  $cm^2$ )。

根据这个公式可以得出以上的径向绝缘结构表面允许的最大场强为 130kV/cm,  $E_r$  分量为 90kV/cm。这说明了以上的绝缘结构的安全系数很大。

按新设计的结构加工的真空界面,在半年的实验中运行稳定,未出现击穿和沿面闪络现象,达到了耐压 1MV 以上的目的。

### 3 结 论

给出了一种径向绝缘的加速器真空界面的设计思路,通过计算给出了界面处的电场分布。径向绝缘具有结构简单,易加工,体积小等优点,并充分利用了原有结构,降低了成本。通过在真空界面三结合点处和固、液界面处采用均压方法,成功地控制了沿绝缘面的电场分布。在阴极电压 1MV 情况下,使真空三结合点附近场强小于 25kV/cm,场强沿面分量平均小于 30kV/cm,在实验中运行稳定。

### 参 考 文 献:

- [1] 刘正云. 一种新型的高功率微波源的设计及加工[D]. 国防科技大学硕士论文, 1993.
- [2] Miller H C. High Voltage Performance Characteristics of Solid Insulators in Vacuum[M]. High Voltage Vacuum Insulation, Ed. R. V. Latham, Academic Press, 1995.
- [3] Moore W B. Supermite Vacuum Interface Design[J]. 5th IEEE Intl. Pulsed Power Conf., 315 - 318, 1985.
- [4] Stygar W A. Design Criteria for the Z Vacuum Insulator Stack[A]. 11th IEEE Intl. Pulsed Power Conf., 168 - 176, 1997.
- [5] Martin J C. Fast Pulse Vacuum Flashover[M]. Plenum Press, 1996.

