

文章编号: 1001-4322(2002)06-0945-04

长脉冲强流二极管径向绝缘研究*

谭杰, 常安碧, 胡克松, 刘庆想, 马乔生, 刘忠

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: 介绍了一种应用于长脉冲强流二极管的径向绝缘结构。简介了真空表面闪络机理, 径向绝缘结构的设计思路。采用锥形绝缘结构, 使用计算机模拟静电场分布优化设计了几何结构参数, 在脉宽为 200ns 的脉冲源上进行了实验研究。二极管最高输出电压为 750kV, 平均绝缘子表面耐电场强度约 50kV/cm, 达到了设计要求。

关键词: 真空表面闪络; 径向绝缘; 长脉冲二极管

中图分类号: TL503 **文献标识码:** A

调制器型强流电子束加速器在输出部件真空二极管与传输线之间需要使用固体绝缘结构, 以实现油与真空的隔离和支撑等要求。绝缘结构有轴向绝缘和径向绝缘两种形式。轴向绝缘结构容易满足均压的要求, 绝缘长度也不受限制, 对各种电压都普遍适用。径向绝缘结构适用于电压较低、结构紧凑、小型化的二极管结构设计。径向绝缘结构还有个优点: 容易避免电子对绝缘子的轰击, 延长二极管寿命。径向绝缘结构设计难点在于: 空间电场分布不均匀, 三相点屏蔽不易实现。在长脉冲下(脉宽大于 100ns)应用时, 由于表面闪络电压阈值显著低于短脉冲下的表面闪络电压阈值, 使得绝缘子设计要求更高, 对空间电场分布的均匀性要求也更为严格。

1 真空表面闪络机理

在真空二极管绝缘结构设计中, 绝缘性能主要依赖于绝缘材料的表面绝缘性能。在真空中高压脉冲沿绝缘子表面击穿放电, 即称真空表面闪络。表面闪络过程可分为产生、发展和形成三个阶段。

产生阶段: 在三相点(阴极、真空、绝缘介质相交点), 由于真空与绝缘介质交界处电场畸变, 增强了该点场强, 阴极金属表面在场致发射作用和热发射作用下发射初始电子。

发展阶段: 是表面闪络形成的关键阶段, 有多种解释, 大致可归结为两类(得到比较多数赞成的观点为第一类)。(1) 二次电子发射崩溃(SEEA, secondary electron emission avalanche)^[1]。主要过程是, 场发射和热发射产生的电子从三结合点发射, 在强电场作用下, 其中一部分电子轰击绝缘子表面, 产生二次发射电子, 二次电子在强电场中得到加速, 再次轰击绝缘子表面, 发生雪崩效应, 建立起表面闪络现象。在这个过程中, 伴随着表面吸附气体解析(气体与吸附层分离)和绝缘子材料的蒸发, 绝缘子受到明显损伤。其中 Anderson 和 Brainard 引入了气体参与表面闪络过程^[2], 认为真空中绝缘子表面通常吸附有气体, SEEA 电子轰击绝缘子表面释放出气体, 形成气体云。气体分子与电子碰撞, 因部分电离而产生正离子, 因此增强了三相点部分的电场, 发射电子和沿绝缘子表面电流都相应增加。(2) 电子引发极化松弛(ETPR, electron triggered polarization relaxation)^[3,4]。这种观点也受到不少研究者的支持, 主要思想是: 在强电场作用下, 绝缘子表面下附近区域被极化, 存在电子层, 当电子层中电子能量超过绝缘子的逸出能时电子发射到真空中, 并在外场作用下向阳极运动, 在其原位置留下带正电的空穴势阱。电子层与势阱非弹性碰撞, 交换能量释放出结构内附着的气体分子, 最终形成真空表面闪络。

两种理论都不能完全自洽地解释表面闪络发生的各种现象, 都有各自的适用性和局限性。例如: SEEA 理论可以解释对磁场的响应, 而 ETPR 理论可解释阳极引起的闪络。

相同电压下长脉冲相对短脉冲的表面闪络阈值要低得多, 这是由于短脉冲三相点的电子由于电场低, 及二次电子数量不足, 难以形成表面闪络; 但在长脉冲下电荷随时间在三相点的积聚, 扩散到强电场区, 产生二次电

* 收稿日期: 2002-02-28; 修订日期: 2002-07-02

基金项目: 国家 863 激光技术领域资助课题(863-410-7)

作者简介: 谭杰(1972-), 男, 硕士生, 现从事脉冲功率技术的研究及应用工作; 绵阳 919-1015 信箱。

子,容易形成表面闪络。

形成阶段:经历发展阶段后,表面吸附气体解析出来,并且有绝缘材料蒸发,表面闪络过程完全建立。

2 设计思想

对表面闪络阈值及各种因素的影响的定量研究主要依赖于实验研究。国际上真空表面闪络的研究涵盖了表面闪络机理,如外形、绝缘子与金属电极的连接、磁场、表面积、表面处理等对真空表面闪络电压阈值的影响及表面闪络的延迟等内容。

在本项研究中,依据 SEEA 理论,采用对三相点屏蔽和对空间电场沿绝缘子几何表面分布的处理方法,解决绝缘子耐压问题。绝缘子的表面耐压效果与绝缘子的表面形状有很大关系,各国多个研究结果表明,表面与电力线呈 45 度角的绝缘子有最佳绝缘效果。并可用马丁(Martin)经验公式估计表面闪络阈值^[5]。

$$Ft^{1/6} A^{1/10} = C \quad (1)$$

式中: F 是闪络击穿电压阈值; t 是脉冲宽度; A 是绝缘表面积; C 为常数。

认为表面积的影响是由于表面积增加,绝缘子与电极接触点(三相点)增多,三相点是引发表面闪络的起点,由此增加了闪络几率。

马丁公式最佳适用于数十到上百 ns 的脉冲,脉冲越长, C 越小。在短脉冲下(约 30ns), C 可取 170~190,而在长脉冲下(约 200ns), C 取 120 左右。在绝缘子表面与电力线交角为 0 时,表面闪络阈值低于 45 度情况下的一半。 C 的取值也和材料有关。

上述经验公式是使用 2~3cm 绝缘长度的样品测试得到的。对大尺寸的绝缘子要达到相同指标比较困难。考虑到我们实际应用条件,取阳极筒内径 $\phi 35$ cm,绝缘距离 15cm。需要满足 200ns 脉宽,电压 750kV 的耐压条件。按(1)式计算表面闪络电压阈值约 90kV/cm。

应用计算机模拟静电场分布进行结构设计,设计中考虑以下三点:(1)选择结构简单、紧凑的锥形绝缘子,绝缘子为单体结构,不带均压环,简化工程设计;(2)尽可能降低三相点(真空、绝缘子、电极交界处)处的电场强度,减少或消除初始电子产生;(3)使阴极电压沿绝缘子表面均匀下降,避免局部产生高场强。

3 计算机模拟及优化设计

模拟采用 KARAT 程序,模拟中发现在整个绝缘表面实现电力线与绝缘子表面呈 45 度相交是几乎不可能的。为简便起见,绝缘子采用与阳极夹角 45 度单体绝缘子,前端加上屏蔽环,降低三相点电压,通过调整屏蔽环半径 R 来改善等势线分布,优化设计二极管绝缘结构。结构见图 1,图 2 是等势线分布,图 3 是电力线分布。

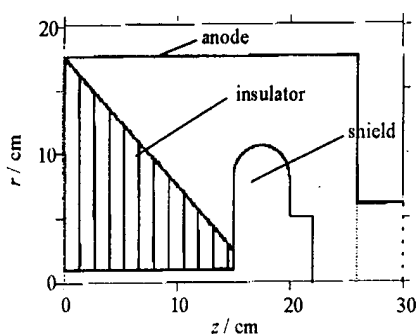


Fig. 1 Geometry structure

图 1 二极管绝缘结构图

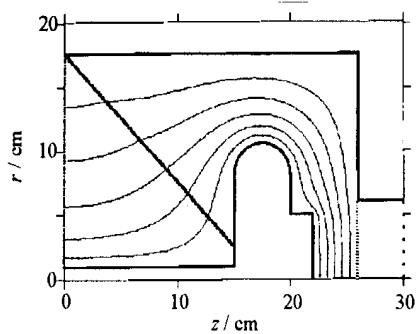


Fig. 2 Equipotential lines distribution

图 2 等势线分布

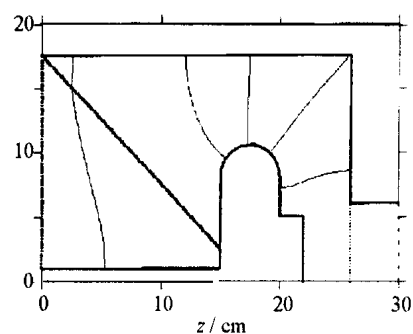


Fig. 3 Electric field lines distribution

图 3 电力线分布

屏蔽环边缘附近电场较强,场发射电子较多,过屏蔽环边缘附近的电力线不能与绝缘子表面相交,防止电子落在绝缘子表面。在绝缘子与阳极夹角保持一定的前提下,这一点由足够大的屏蔽环半径来保证。在阴极电压 750kV 下, R 改变后,沿绝缘子表面的电场分布变化和角度变化做了比较,见图 4 和图 5(阴极电压 750kV,角度为电场方向和绝缘子表面夹角取绝对值)。在距阴极三相点 2mm 处电场强度约为 30kV/cm($R = 10.5$ cm)。

由图 4 可见, R 增大可使电场沿绝缘子表面分布更均匀,也使三相点场强更低,但也有一定限制。 R 增大使屏蔽环边缘接近阳极,边缘电场增大,增加了场发射电子带来的能量损失。模拟结果对应 R 为 7.5, 10.5 和 13.5cm,屏蔽环边缘附近电场强度分别为 210, 240 和 280kV/cm,设计取 R 为 10.5cm。由图 5 可知,存在电力线

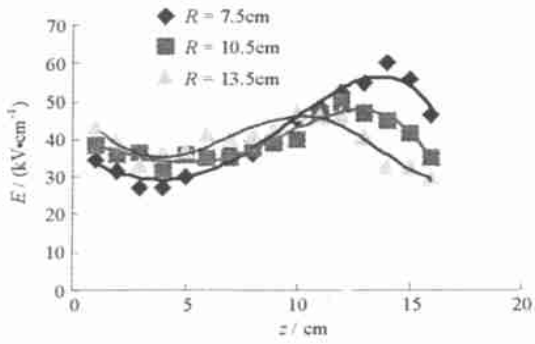


Fig. 4 Electrical field (absolute value) distribution along insulator surface

图 4 电场(绝对值)沿绝缘子表面分布

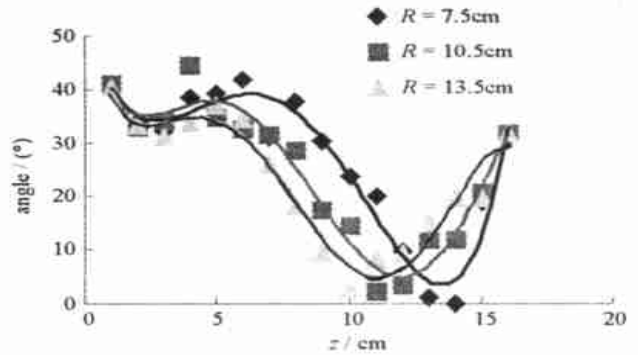


Fig. 5 Angle of electrical line variation along insulator surface (angles of absolute value)

图 5 电力线沿表面角度变化(角度取绝对值)

与绝缘子表面平行的地方,该点电场大约为 50kV/cm,已接近了表面闪络阈值,是整个绝缘子最为薄弱的地方,实验也证实了模拟结果。

4 实验及结果

实验中使用的是有箔平面二极管,绝缘材料为尼龙,阴极为平绒阴极,阳极箔为钨网,电压测量采用电阻分压器,电流测量采用法拉第筒,实验装置图见图 6。实验中加速器输出脉冲脉宽约 200ns,实验真空度约 0.01Pa,阴极电压 300 ~ 750kV 可调,二极管阻抗为 100 。

对绝缘子表面是否发生真空表面闪络的判断是看电压波形是否正常(与假负载波形作对比),发生真空表面闪络后电压波形有两个现象:一是电压低于正常电压值,二是波形后沿变陡。图 7 和图 8 分别是正常电压波形和发生闪络后的电压波形。

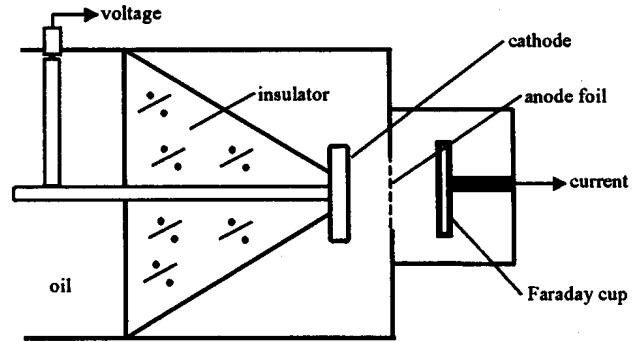


Fig. 6 Experimental device

图 6 实验装置图

新加工的绝缘子的耐压性能通常要低于表面闪络电压阈值。在低于表面闪络电压阈值的高压下进行耐压实验,有利于改善绝缘子表面耐压性能,当所加高压高于表面闪络电压阈值时,表面闪络对绝缘子表面将会造成永久性损伤,降低绝缘子表面耐压性能。实验中我们先在 300 ~ 500kV 作了数十次老炼实验,然后逐渐升压,最后绝缘子的耐压达到了 750kV,由于加速器最大输出电压所限,未能做更高电压的实验。目前该二极管结构已经过了 300 多次实验,工作稳定。

在多次实验后,发现在绝缘子表面局部地方有电子轰击痕迹,与模拟中电力线与绝缘子表面平行的地方是同一位置,印证了模拟结果。

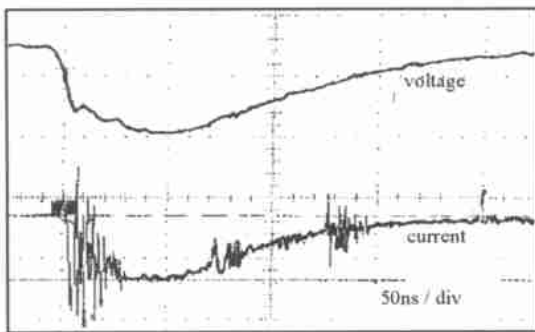


Fig. 7 Normal voltage and current waveform of diode

图 7 正常电压、电流波形

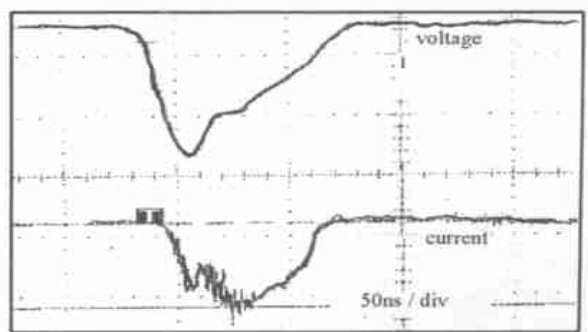


Fig. 8 Flashover happened voltage and current waveform of diode

图 8 发生闪络的电压、电流波形

5 结 论

径向绝缘子尺寸在空间上受限制,不能像轴向绝缘子那样方便地增加绝缘长度,同时也不容易使用均压环来改善电场的分布,因此对电场分布均匀性要求和对三结合点屏蔽要求都相当严格。采用锥形绝缘子,不带均压结构,可使结构简单化而更具有实用性,但绝缘性能也受到了一定限制。实验中绝缘子表面局部电场已接近模拟分析的阈值。设计中采用何种结构需要根据具体应用情况来考虑。

参考文献:

- [1] Miller H C. Flashover of insulators in vacuum[J]. *IEEE Trans Insul*, 1993, **28**:512—527.
- [2] Anderson R A, Brainard J P. Mechanism of pulsed surface flashover involving electronstimulated desorption[J]. *J Appl Phys*, 1980, **51**:1414—1421.
- [3] Blaise G, Gessus C L. Charging and flashover induced by surface polarization relaxation process[J]. *J Appl Phy*, 1991, **69**:6334—6339.
- [4] Blaise G. New approach to flashover in dielectrics based on a polarization energy relaxation mechanism[J]. *IEEE Trans Insul*, 1993, **28**:437—443.
- [5] Martin T H. J. C. Martin on pulse power[M]. New York: Plenum Press, 1996. 258.

Research of long pulse high current diode radial insulation

TAN Jie, CHANG An-bi, HU Ke-shong, LIU Qing-xiang, MA Qiao-sheng, LIU Zhong
(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1015, Mianyang 621900, China)

Abstract: A radial insulation structure which is used in long pulse high current diode is introduced in this paper. The theory of vacuum flashover and the idea of design are briefly introduced. In the research, cone shaped insulator was used. The geometry structure parameters were optimized by simulating the static electrical field distribution. Experiment was done on a pulse power source with 200ns pulse width. The maximum voltage 750kV was obtained, and the average stand-off electrical field of insulator is about 50kV/cm.

Key words: vacuum surface flashover; radial insulation; long pulse diode