

文章编号: 1001-1609(2007)06-0463-03

# 高梯度真空绝缘子结构的模拟设计

屈立辉, 刘列, 吕志辉, 徐启福

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

System Structure Designing of High-gradient Vacuum Insulator

QU Li-hui, LIU Lie, LU Zhi-hui, XU Qi-fu

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, china)

摘要: HGI 是由周期性的导体层和绝缘层装配而成, 周期长度、绝缘层与金属层厚度比例的改变都会影响绝缘性能。绝缘材料选定为 Kapton, 导体材料选定为无锈钢, 导体层与绝缘层齐平, 利用有限元软件对不同几何结构、不同外电场情况下的电子轨迹进行模拟。电子轨迹的数值模拟计算表明:

①设计合理时, HGI 中的周期性电场能够抑制电子崩的发展。其中周期长度 0.2 mm, 厚度比例为 5 的结构最有可能得到好的绝缘效果; ②绝缘层为 +45° 结构时效果更好; ③模拟软件本身有一定的局限性。

关键词: 高梯度绝缘子; 结构设计; Kapton; 电子轨迹;

数值计算

中图分类号: TM854

文献标志码: A

Abstract: HGI is assembled by the periodic conductor layers and insulation layers, and the changing of the cycle length, the thickness proportion of insulation layers and metal layers also affect the insulation performance. Kapton and stainless steel were selected respectively as the insulating and conducting material. The effect of different exterior electric field and different configurations on the performance of well-conditioned, flat-surface HGI assemblies was investigated by simulating the orbits of electron near the HGI surface based on finite-element software. Numerical calculation of electron orbits has shown that: ①the periodic electric field in HGI assemblies can restrain the development of electron multiplication. Better performance could be attained while  $L=0.2\text{ mm}$  and  $I/M=5$ ; ②the +45-degree structure shows a better performance than the standard flat-surface HGI; ③ there are some limitations in the software which can not reflect the physics of vacuum surface breakdown veraciously.

Key words: high-gradient insulator; structure design;

Kapton; the orbits of electron;

numerical calculation

## 0 引言

高梯度绝缘子结构(HGI)是由周期性的毫米量

级或更薄的绝缘材料和导体金属环交替排列层叠而成, 是 20 世纪 80 年代初期文[1]首先提出的, 也叫做微堆层绝缘子, 其结构见图 1。

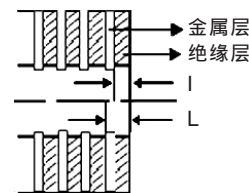


图 1 高梯度绝缘子结构示意图

这种结构中电场分布更加均匀, 金属层可以干扰表面放电过程, 间断电子崩的连续发展<sup>[2]</sup>, 并能避免闪络级联<sup>[3]</sup>, 因此对真空表面闪络击穿有更好的抵制力。大量的实验结果显示其平均击穿电场比传统的绝缘子高许多, 通常是 1.5~4 倍<sup>[3, 4]</sup>, 在 100 ns 脉冲电压条件下, 更得到了典型耐压强度 280 kV/cm, 最高耐压强度 400 kV/cm 的结果<sup>[1]</sup>, 有利于高压绝缘装置的紧凑化。20 世纪 90 年代文[5]提出的新型加速器概念——介质壁加速器(DWA), 其关键技术之一就是高梯度绝缘介质壁。由于国内加工能力方面的限制, 笔者只限于 HGI 结构设计的模拟研究。在软件方面, 由于网格划分精度有限, 笔者只设计一个小尺寸轴向绝缘子, 内半径 30 mm, 厚度 30 mm, 要求耐受电场强度大于 150 kV/cm。利用模拟软件对各种几何结构进行了不同电场条件下的电子轨迹的数值模拟, 并对绝缘层锥角为 +45° 的 HGI 结构进行了模拟研究。

## 1 理论基础及材料的选定

根据文[6]理论, 当高能粒子碰撞绝缘表面时, 能够产生一定数量的二次电子, 当这些二次电子在外电场的加速作用下再次碰撞表面时, 有可能产生更大数量的次级电子, 并在表面留下正电荷, 吸引更多

收稿日期: 2007-05-23; 修回日期: 2007-08-07

作者简介: 屈立辉(1979-), 男, 助教, 硕士研究生, 主要从事脉冲功率技术及高压绝缘的研究。

的电子碰撞表面，引发电子流的不稳定增长及绝缘表面气体的解吸附，最终导致表面闪络击穿。可见引起闪络击穿有 3 个必要的过程：①高能电子碰撞绝缘表面；②上述过程产生的次级电子在外电场作用下加速并再次碰撞到表面；③大量的解吸附或热分解气体形成贯穿性导电通道。HGI 结构中的周期性电场分布能够对前两个过程提供一些保护<sup>[7]</sup>。根据这种理论，利用有限元软件 COMSOL Multiphysics 3.2 对多种几何结构中的电子轨迹进行数值模拟，寻求有利于抑制表面闪络的最佳结构。

为了抑制贯穿性导电通道的形成，在模拟中绝缘材料选定为 Kapton。Kapton (C<sub>22</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 是工业上常用的缩聚类芳香族聚酰亚胺，其主链结构中含有芳环和杂环，这些都是耐热的组分，高温老化时环的一部分断裂后开环，使主链断裂的几率减小<sup>[8]</sup>，耐热性和热稳定性非常好，长期使用温度为 -200 ~ 300，热分解温度 500 左右，具有阻燃性以及自熄能力。在极高的真空度下出气量很少，相对介电常数 3.4 左右，并且具有很强的耐辐照性能，对 X-ray、光子引起的闪络有抑制作用，因此可能得到更好的耐压效果。

## 2 模型的建立

图 2 为所研究的轴对称绝缘子结构图及网格划分图，内半径 30mm，外半径 40mm，厚度 30mm，单元周期长度 L=0.4mm，绝缘层与金属层厚度比例 I/M=1，将绝缘子放置在平板电极结构中，阴极板在下，为零电位，阳极板在上，所施电压极性为正，平均轴向外电场为 150kV/cm，且呈轴对称分布。二次电子的初始能量一般服从麦克斯韦分布，能量非常小，只有几个电子伏<sup>[9]</sup>，在外界强电场作用下这个初始能量对于轨迹的影响非常小，为模拟方便，初始能量设为零。研究的重点区域集中于绝缘表面，因此网格划分相比于中心轴附近更为细密。模拟结果表明该结构中电场也具有周期性(图 3)，周期数的多少不影响单元内电场分布。为研究方便，将绝缘单元划分为 5 个区域，分别为 A、B、C、D 区以及最靠近绝缘表面的 S 区，见图 3。当二次电子产生于 C、D 区时，由于受到径向电场的吸引力，电子会马上被俘获，不能从外电场获得足够的能量促成下一次的二次电子发射。

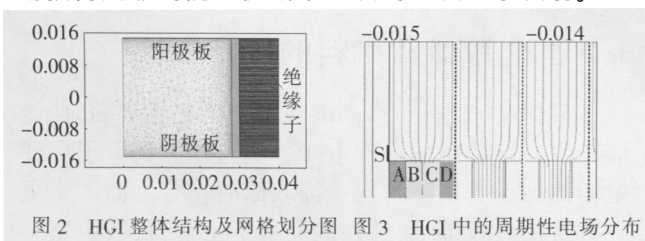


图 2 HGI 整体结构及网格划分图

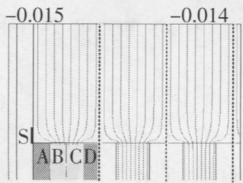


图 3 HGI 中的周期性电场分布

笔者也对外表面 S、A 区、B 区的电子进行了模拟，分别见图 4~6。发现：①外界电子(由外表面 S

进入的电子)不会碰撞到表面及对表面，初始位置离绝缘表面越近，电子偏转量越大。其原因是因为电子在 A、B 区受到径向的排斥力而远离表面，虽然在 C、D 区受到吸引力，但由于在外电场的加速作用下速度加快，经过 C、D 区的时间短，因此总体上运动趋势是远离表面的；②A 区电子也不会碰撞到表面及对表面，原理同上；③B 区电子有可能再度碰撞到表面，是否能引发电子流不稳定增长的关键，但是由于模拟软件本身的限制，网格划分不够细密，导致电子轨迹不够平滑，误差较大。在其他几何结构的模拟中也发现了相同的现象。基于上述的模拟分析，必须对原始实体模型进行简化。

在大量的模拟中也发现：①电子轨迹呈现出波浪状，如果在前几个周期内没有和表面发生碰撞，就会逐渐远离表面，因此只研究前几个周期电子轨迹就可以了；②由于所设计的结构中，电子不会碰撞到对表面，因此在对绝缘表面电场分布影响非常小的前提下，模型中径向长度也可以适当缩短。在此基础上建立的简化模型见图 7：只有 3 个周期，共 1.2mm，内半径 1mm，外半径 1.5mm，其中距离中轴线 0.8~1.1mm 范围内网格划分参数为  $4 \times 10^{-6}$ ，设定跟踪粒子步长为  $1 \times 10^{-3}$  mm，允许误差为  $1 \times 10^{-7}$ ，其余参数为默认值。

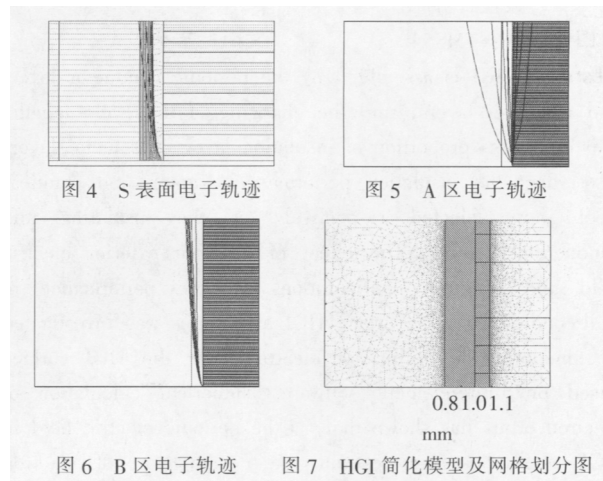


图 4 S 表面电子轨迹

图 5 A 区电子轨迹

图 6 B 区电子轨迹

图 7 HGI 简化模型及网格划分图

## 3 电子轨迹的数值模拟

在外电场为 150kV/cm 时对上述结构中 B 区电子轨迹进行模拟，见图 8(图中只显示了所关心的那部分电子，其余电子或者远离表面，或者碰撞到同一周期的 C 区 D 区，都不会引发电子流的不稳定增长。为了清楚起见，对模拟图在径向方向上进行了放大处理)。从模拟图中可以看到，在这种结构中没有发生 B 区电子在外电场作用下再次碰撞下一周期 B 区的情况，认为这种结构是有利于抑制表面闪络击穿的。而在 I/M=3 时却出现了电子掠射入下一周期单元 B 区的现象，见图 9，认为这种结构会促发表面闪络的发生。

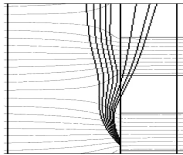


图8  $L=0.2\text{ mm}$ ,  $I/M=1$  时 B 区电子轨迹

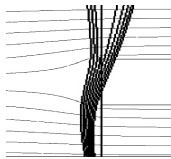


图9  $L=0.2\text{ mm}$ ,  $I/M=3$  时 B 区电子轨迹

对于其他结构,笔者也进行了不同外电场条件下的电子轨迹数值模拟,结果见表1,“ $\times$ ”为该结构能够抑制表面闪络击穿;“ $\times$ ”为该结构会促发表面闪络击穿。

表1 不同结构、不同外电场条件下的电子轨迹数值模拟结果

L/mm	E/(kV·cm <sup>-1</sup> )	I/M						
		11	21	31	41	51	61	71
0.4	150			×	×	×	×	×
	200			×	×	×	×	×
	250			×	×	×	×	×
0.3	150		×		×	×	×	×
	200		×		×	×	×	×
	250		×		×	×	×	×
0.2	150						×	×
	200					×	×	×
	250						×	×
0.1	150				×	×	×	×
	200					×	×	×
	250					×	×	×

从表1中可以看到:①绝缘单元周期长度不一定越小越好。当 $L < 0.2\text{ mm}$ 时有绝缘性能变差的可能性;②当金属层过薄时,由于径向排斥力不明显,且作用范围减小,有可能也会促发表面闪络;③不同外电场条件下模拟结果之间存在差别,但在数据表格中没有得到明显体现。可能有两个主要原因:一是不同外电场条件下,处于临界状态的电子是不相同的;二是在更高的外电场下,虽然没有发现电子碰撞表面,但当贴近表面运动的电子较多时,绝缘表面缺陷引起的电场扭曲或者表面正电荷有可能吸引电子而使电子碰撞到绝缘表面,促发电子流的不稳定增长,表一无法反映这一现象。这一现象同时也说明了本文的粒子模拟存在局限性,不能完全真实地反映表面闪络击穿这个复杂地多样的物理过程。

需要说明的是,为了便于比较,表1中的各种结构在模拟过程中网格划分参数相同,当采用更为细密的网格划分时,结果略有不同。如对 $L=0.2\text{ mm}$ ,  $I/M=5$ 结构进一步细化时,发现外电场为 $200\text{ kV/cm}$ 时,

也能抑制表面闪络击穿。

## 4 +45° 锥角结构的初步讨论

在传统的绝缘子设计中,+45°锥角结构扮演了重要角色,引入到HGI结构设计中也有望得到更好的结果。笔者也对该结构进行了数值模拟,取 $L=0.2\text{ mm}$ ,  $I/M=5$ ,外电场为 $400\text{ kV/cm}$ ,模拟结果见图10。

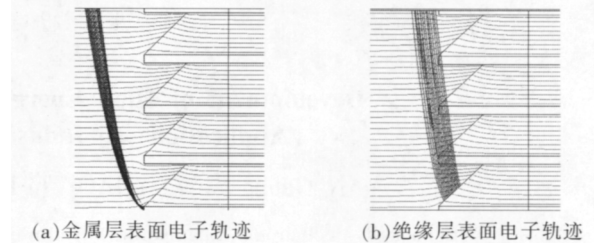


图10  $L=0.2\text{ mm}$ ,  $I/M=5$  的+45°结构中金属层表面以及绝缘层表面的电子轨迹

模拟发现:①电场分布也具有一定的周期性;②径向排斥力的作用范围很大,而径向吸引力作用范围很小,总体上对电子的排斥作用占主导地位;③无论是绝缘层还是金属层表面的电子,都没有发现电子再次碰撞绝缘表面的现象,当外电场在 $400\text{ kV/cm}$ 以上时也得到了相同的结论。电子或者远离绝缘表面,或者直接碰撞到对面的金属层,不会对其他的绝缘单元造成直接的影响。

上述模拟结果说明了HGI各个单元之间相关性很小,基本是相互独立的,整个绝缘子的绝缘能力是各个绝缘单元的绝缘能力之和。绝缘单元的击穿原理和相同锥角结构的传统绝缘子击穿之间有很多相同之处。绝大多数电子在外电场的作用下直接运动到阳极(对面的金属层),而不会参与电子崩的发展,其耐压极限接近于真空击穿。文[1]在 $100\text{ ns}$ 条件下得到了 $400\text{ kV/cm}$ 的结果,与相同系统测得的真空击穿强度 $450\text{ kV/cm}$ 非常接近。

## 5 结语

通过模拟研究发现, $L=0.2\text{ mm}$ ,  $I/M=5$ 的结构在模拟的所有结构中是最好的,在这种结构中电子崩的发展能够得到抑制,且周期单元内 $I/M=5$ 值较大,绝缘层内部平均场强较小,降低了发生体击穿的可能性。当绝缘层采用+45°锥角结构时效果更好。模拟表明该设计是能够满足电场强度大于 $150\text{ kV/cm}$ 的小型轴向绝缘子要求的。

笔者的模拟研究也存在一些局限性,这些局限性的根源在于表面闪络击穿过程是一个发生在 $\text{ns}$ 量级时间范围内的多样的复杂的物理过程,研究工作还有待进一步的深入。

## 参考文献:

[1] ELIZONDO J M. Novel High Voltage (下转第473页)

表 2 尺寸为  $\phi 80/\phi 100 \times 1 060$  与  $\phi 80/\phi 104 \times 1 070$  的环氧管试品的变形量和 E 值

测量方向	负荷/N		变形量/mm		E/GPa		E 的平均值/GPa	
	$\phi 80/\phi 100 \times 1 060$	$\phi 80/\phi 104 \times 1 070$	$\phi 80/\phi 100 \times 1 060$	$\phi 80/\phi 104 \times 1 070$	$\phi 80/\phi 100 \times 1 060$	$\phi 80/\phi 104 \times 1 070$	$\phi 80/\phi 100 \times 1 060$	$\phi 80/\phi 104 \times 1 070$
第 1 次试验	1 500	1 500	17	14	12.09	11.72		
	3 000	3 000	35	31	11.74	10.59	12.00	10.90
	4 500	4 500	51	46	12.09	10.70		
	6 000	6 000	68	62	12.09	10.59		
将环氧管沿轴向旋转 180°	1 500	1 500	17	15	12.09	10.94		
	3 000	3 000	35	30	11.74	10.94	11.96	11.00
	4 500	4 500	51	44	12.09	11.91		
	6 000	6 000	69	60	11.91	10.94		

得出了 E 的近似值,即为 11.5 GPa。此方法可被应用到其它 PMOA 机械强度的计算中去。

(3) E 值的作用:主要反映了环氧管变形量,即机械强度的性能。

(4) 虽然相关书籍都没有给出 E 的参数,但可以利用式(3)、(4)对 PMOA 的机械强度进行计算,从而得出相近的数值,为设计生产 PMOA 的单位提供一定的参考值。

### 参考文献:

- [1] IEC 60099-4. 交流系统用无间隙金属氧化物避雷器[S].
- [2] GB 11032-2000. 交流系统用无间隙金属氧化物避雷器[S].
- [3] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [4] 交流输电线路用复合外套金属氧化物避雷器 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [5] GB/T 311.1~311.6-1983. 高压输变电设备的绝缘配合高电压试验技术[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.
- [6] 邱毓昌. 高电压工程[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.

(上接第 465 页)

- [1] Surface Flashover Insulator Technology [C]// Albuquerque: 9th IEEE International Pulsed Power Conference, 1993: 257-260.
- [2] NUNNALLY W C, KROGH M. Investigation of Vacuum Insulator Surface Dielectric Strength with Nanosecond Pulses [C]// Dallas, Texas: 2003 Pulsed Power Conference, 2003: 15-18.
- [3] SAMPAYAN S E, CAPORASO G J, SANDERS D M, et al. High-performance Insulator Structures for Accelerator Applications [C]// New York: Particle Accelerator Conference, 1998: 1308-1310.
- [4] SAMPAYAN S E, VITELLO P A. Multilayer High Gradient Insulator Technology [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 17(3): 334-339.
- [5] CAPORASO G. Progress in Induction Linacs [C]// Monterey, California: XX International Linac Conference, 1999: 658-662.
- [6] ANDERSON R A, BRAINARD J P. Mechanism of Pulsed Surface Flashover Involving Electron Stimulated Desorption [J]. J. Appl. Phys. 1980, 51(6): 1414-1421.
- [7] LEOPOLD J G, DAI U, FINKELSTEIN Y, et al. Optimizing the Performance of Flat-surface, High-gradient Vacuum Insulators[J]. IEEE Appl. & Tech. Phys., 2005: 12(3): 530-536.
- [8] 唐传林, 季承钧, 单书发. 绝缘材料工艺原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [9] RODNEY M J, VAUGHAN. A New Formula for Secondary Emission Yield [J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 1989, 36(9): 1963-1967.

## 第 1 届电器装备及其智能化学术会议在西安召开

简讯

西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室和西安高压电器研究所共同主办的第 1 届电器装备及其智能化学术会议于 11 月 8 日~10 日在西安召开。本届学术会议由中国电工技术学会电接触及电弧专业委员会、输变电设备专业委员会、电器智能化系统及应用专业委员会和中国电机工程学会变电专业委员会共同发起,会议的主题是电器领域节能、环保、智能化等技术的创新与发展和产品研发。来自国内外 110 个单位的 236 名专家学者参加了本次会议,会议共收录学术论文 106 篇,其中在会上宣读的论文有 29 篇。

西安交通大学党委书记、中国电工技术学会副理事长、电力设备电气绝缘国家重点实验室主任王建华教授担任会议主席,中国西电集团副总经理、西安高压电器研究所有限责任公司董事长裴振江教授级高工和中国电工技术学会理事、电接触及电弧专业委员会主任委员马志瀛教授担任会议副主席。会议还特别邀请了西安交通大学张杭教授和 IEC/SB1 主席池田久利博士分别作了《电器智能化新技术》、《IEC 相关动态》的专题报告。