

真空中高压电极结构的单次脉冲沿面闪络耐压研究

程焰林, 向伟, 雷杨俊

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 电极作为高压绝缘子的加载对象, 在电真空器件中有着至关重要的作用, 合理的电极结构设计可以有效地提高高压器件的沿面耐压。笔者从实际的应用出发, 针对几种新型电极结构进行了电场仿真和实验耐压实验, 给出了不同电极情况下, 氧化铝陶瓷的耐压结果。结果表明, 新型电极结构能有效减弱氧化铝陶瓷三结合处的电场强度, 并在一定程度上提高绝缘子耐压能力, 相对于平板电极, 其平均最高耐压提高了 55%。

关键词: 氧化铝陶瓷; 真空; 单次脉冲; 电极结构; 闪络耐压

中图分类号: TM854

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)03-0011-04

Single-pulsed Surface Flashover Hold-off Voltage of Electrode Geometry in Vacuum

CHENG Yan-lin, XIANG Wei, LEI Yang-jun

(Institute of Electronic Engineering of CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The electrode which is usually used as the carrier of the high-voltage insulator is very important for the vacuum electronic devices. The reasonable design of the electrode geometry can considerably improve the surface flashover hold-off voltage of the insulator. In this paper, the influence of several geometries on the electric field distribution at the triple junction was simulated and experimentally studied. The single pulsed flashover hold-off voltage tests of cylindrical alumina insulators in vacuum were conducted. The results indicate that these geometries weaken the electric field at the triple junction, and the average hold-off voltage limit of the alumina ceramics is increased by 55% with the concave electrode compared to the plate electrode.

Key words: alumina ceramics; vacuum; single-pulse; electrode geometry; flashover hold-off voltage

0 引言

氧化铝陶瓷以其优良的机电性能在特种电真空器件中被广泛应用, 起着高压绝缘、真空密封以及支撑固定的作用^[1]。随着脉冲功率技术和电真空器件技术的迅速发展, 对氧化铝陶瓷的耐压性能提出了更高的要求。实践表明, 在真空条件下, 氧化铝陶瓷绝缘子耐压水平往往低于其体击穿强度和相同尺寸的真空间隙的耐压水平, 其原因就是绝缘子表面发生了沿面闪络击穿。由于真空器件在特定的环境中, 氧化铝陶瓷绝缘子表面绝缘能力的提高已成为电真空领域所关注和亟待解决的问题之一。电极作为高压的加载对象, 其结构上的变化对绝缘子沿面耐压有着至关重要的作用。国外早在 20 世纪 60 年代就有相关报道^[2,3], 但在单次微秒级脉冲加载电压下缺少实验研究和系统分析。笔者对几种新型电极结构

进行了场强仿真计算和实验研究, 并以氧化铝陶瓷为绝缘子对不同的电极结构进行了绝缘耐压实验, 结果表明, 只要设计合理, 通过电极结构上的优化就可以显著提高绝缘子表面的耐压能力。

1 实验装置及实验方法

1.1 实验装置

在真空中, 单次脉冲电压下, 氧化铝陶瓷耐压性能研究的实验装置框图见图 1, 金属电极结构见图 2。图 1、2 中氧化铝陶瓷绝缘子是高度为 50 mm、直径为 33 mm 的柱状陶瓷, 绝缘子置于两电极之间, b 、 c 是变量。实验的真空度在 10^{-3} Pa, 脉冲高压电源产生约 3 μ s 的单次脉冲电压, 电压幅度范围为 20~160 kV, 采用数字存储示波器分别通过电阻分压器和电流线圈监测绝缘子上的电压和回路中电流, 以评估绝缘子的耐压特性。图 3 分别示出了未发生击穿、绝缘子前沿和后沿击穿情况下, 典型的电压和电流波形。

收稿日期: 2008-04-14; 修回日期: 2008-11-23

基金项目: 国防“十一五”预研项目。

作者简介: 程焰林(1982), 男, 在读硕士研究生, 主要从事高压绝缘结构的相关研究。

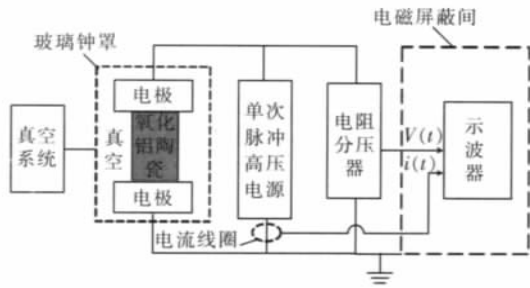


图1 耐压测试实验框图

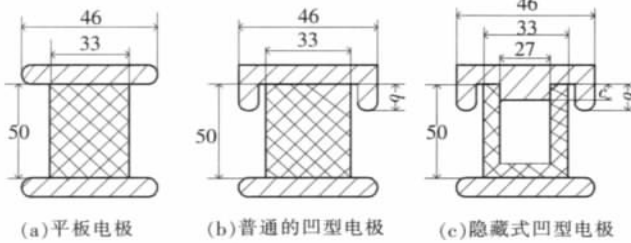


图2 电极结构示意图(单位:mm)

1.2 表征方法

由于沿面闪络现象具有很强的随机性、不确定性，如何客观地去评价绝缘结构耐压性能的好坏就显得尤其重要^[4,5]。正由于这种不确定性，用耐压值去描述耐压性能其实际意义不大，国内外相关研究者习惯于选择恰当的实验测试方法，在相同的测试方法下对比不同实验样品的耐压性能，只给出耐压性能的对比，而不给出确定的耐压值^[4,6]。

考虑到测量的准确度、结果的重复性、复现性及操作性，在大量实验测量基础上，确定了表征耐压的方法，见图4。方法如下：起始加载电压为40kV，同一加载电压最多连续触发30次，一旦出现连续10次不击穿，就逐步升高电压，连续3次击穿后逐步降低触发充电电压，如果仍然击穿，继续降低电压，出现连续10次不击穿后，再升高电压值，重复上述过程，共完成至少3个循环。实验中记录首次击穿电压记为 u_{fb} ，首个连续3次都击穿的电压记为 u_{co} ，即限制电压。从 u_{co} 逐步降低电压，首个连续10次均不击穿的电压记为 u_{fb} ，即可靠电压，最高10次不击穿的电压记为 u_{fb} 。另外，为了确保实验结果的准确性，在每组金属电极结构，采用3个氧化铝陶瓷绝缘子。

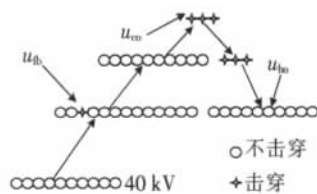
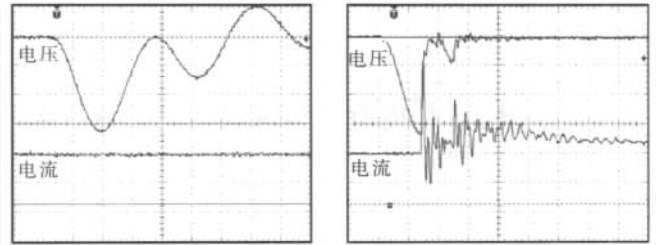


图4 试验方案示意图

2 结果分析和讨论

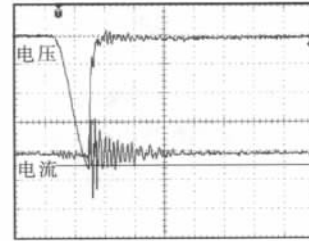
2.1 电场仿真

目前，对于沿面闪络击穿还没有统一的机制去



(a) 正常波形

(b) 前沿击穿

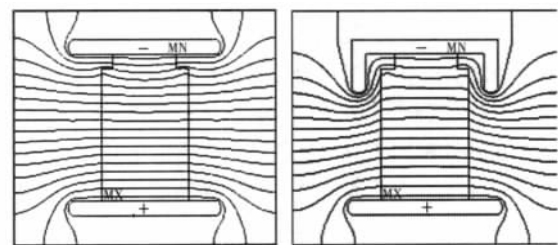


(c) 后沿击穿

图3 典型的电压和电流波形

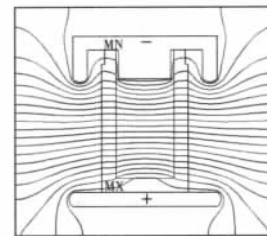
合理地解释所有的击穿现象，但对于沿面闪络的起始原因研究者一致认为是阴极三结合处微小间隙引起的局部场强增强，导致一次电子的发射而引起。电极结构的改变可以在一定程度上减小阴极三结合处微小间隙引起的局部场强的增强，从而提高沿面闪络耐压性能^[7-11]。

运用 ANSYS 软件仿真，对比了几种电极结构的等位线分布情况。为了更贴近实际情况，在模型建立的时候，在两种电极结构的阴极三结合处构建了一个 0.3 mm×0.4 mm 的小间隙，输出的仿真结果分别见图5。通过对比可以看出，凹型电极可明显减弱阴极三结合处位置的电场强度，屏蔽电极和陶瓷绝缘材料连接处缺陷引起电场畸变。图6分别示出了电极长度对阴极三结合处位置电场强度影响的变化曲线图。从图6中可以看出，三结合处的电场随着 b 值、 c 值的增加而减小，更有利于抑制阴极三结合处电子发射。



(a) 平板电极

(b) 普通的凹型电极



(c) 隐藏式凹型电极

图5 不同电极结构情况下的电场分布图

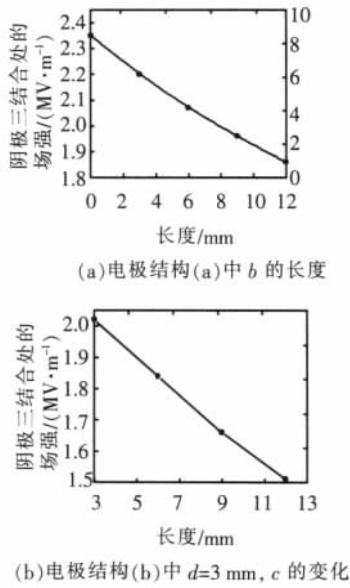


图6 阴极三结合处最大场强变化趋势图

2.2 实验结果与讨论

表1给出了真空中单次脉冲情况下,不同b值的普通凹型电极情况下,柱状氧化铝陶瓷的耐压性能;表2给出了隐藏式凹型电极不同b、c值时,柱状氧化铝陶瓷的耐压性能。从表1、2中可以看出,每组电极结构的首次击穿电压相差最大为16kV。出现这种现象的主要原因是,每组电极结构的三个绝缘子的材料和表面状况等不完全相同,相应实验得到的可靠耐压和最高耐压也存在差异。并且由于通过多次的重复加载,外部的条件影响在很大程度上得到削弱,因此可靠耐压和最高耐压能较好地反映不同电极情况下氧化铝陶瓷绝缘子的耐压性能。从表1、2中可知,不同的电极结构情况下,氧化铝陶瓷绝缘子的耐压值明显不同,普通凹型电极的最高耐压值接近150kV,而平板电极的最高耐压值接近120kV,其中普通凹型电极明显优于平板电极结构,这和仿真结果是一致的。对比表1、2可知,隐藏式凹型电极整体的耐压性能要优于普通的凹型电极,最高耐压值达到170kV,而且在耐压测试过程中的前后耐压值波动性较小。

凹型电极耐压性能得到提高的主要原因是由于电极的抬高,对阴极三结合处的场强有着很好的屏蔽作用,在源头上抑制了在较低电压加载时沿面闪络的发生;隐藏式凹型电极优于普通凹型电极的主要原因是由于d的引入进一步抬高了电极,增强了对三结合处的场强的屏蔽作用;其次是切向分量变小,减小了对电子的水平加速。式(1)^[6]给出了到达碰撞点时一次电子的能量,可见切向分量的减小可以降低电子能量的增加;再者由于绝缘子与电极接触面减小,减少了场强畸变点,减少了一次电子的发射。

$$E_i = \frac{1}{2} m_e v_i^2 = E_p \left(1 + \frac{4F_{//}^2}{F_{\perp}^2} \cos^2 \theta_p + \frac{4F_{//}}{F_{\perp}^2} \sin \theta_p \cos \theta_p \right) \quad (1)$$

表1 不同b值的凹型电极情况下,柱状氧化铝陶瓷的耐压结果 kV

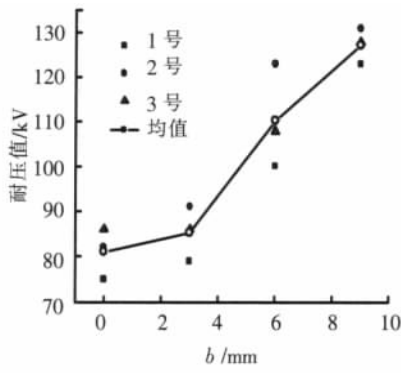
绝缘子结构及样品编号	首次击穿电压 U_{ib}	可靠电压 U_{ib}	最高耐压 U_{ib}	
凹型电极 (b=0 mm)	1号	79	75	79
	2号	95	82	100
	3号	95	86	119
凹型电极 (b=3 mm)	1号	79	79	86
	2号	82	91	95
	3号	79	86	100
凹型电极 (b=6 mm)	1号	115	100	111
	2号	119	123	137
	3号	115	108	131
凹型电极 (b=9 mm)	1号	121	123	142
	2号	108	131	147
	3号	112	128	147

表2 不同b、c值隐藏式凹型电极情况下,柱状氧化铝陶瓷的耐压结果 kV

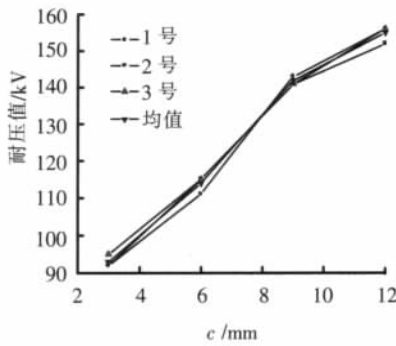
绝缘子结构及样品编号	首次击穿电压 U_{ib}	可靠电压 U_{ib}	最高耐压 U_{ib}	
隐藏式凹型电极 (d=3 mm, c=3 mm)	1号	95	92	100
	2号	103	92	103
	3号	97	95	100
隐藏式凹型电极 (d=3 mm, c=6 mm)	1号	103	115	131
	2号	115	111	137
	3号	119	115	131
隐藏式凹型电极 (d=3 mm, c=9 mm)	1号	137	141	160
	2号	134	143	166
	3号	137	141	160
隐藏式凹型电极 (d=3 mm, c=12 mm)	1号	137	152	166
	2号	143	156	166
	3号	137	156	160
隐藏式凹型电极 (c=3 mm, d=0 mm)	1号	79	79	86
	2号	82	82	95
	3号	79	82	92
隐藏式凹型电极 (c=3 mm, d=5 mm)	1号	103	115	131
	2号	115	111	137
	3号	119	115	131
隐藏式凹型电极 (c=3 mm, d=8 mm)	1号	137	141	160
	2号	134	143	166
	3号	137	141	160

式(1)中, m_e 为电子质量; v_i 为发生碰撞时电子的运动速度; E_p 为电子出射起始能量; $F_{//}$ 为电场场强切向分量; F_{\perp} 为电场场强垂直分量; θ_p 为电子初始运动方向与电极表面夹角。

图7给出了隐藏式凹型电极不同b、c、d值对应的耐压性能变化关系。可以发现,随着b、c、d值的增加,可靠耐压和最高耐压都有一个递增趋势。对比图6、7,显然三结合处最大场强与耐压性能成反比例关系,尽可能地减小三结合处的场强可以提高整体的耐压性能。对比图7(a)、(b),可以发现隐藏式凹型



(a)普通凹型电极



(b)隐藏式凹型电极

图7 不同凹型电极结构的耐压变化曲线图

电极的耐压测试结果的分散性要好于通常的凹型电极,不同实验样品的耐压值相对很集中,从侧面说明了隐藏式凹型电极可以在一定程度上减小外界因素对实验耐压测试的影响。

3 结语

通常凹型电极和隐藏式凹型电极均可有效地抑制阴极三结合处由于微小间隙引起的局部场强增强,并且随着 b 、 c 值的增加抑制效果越显著。两种电极结构均可以在一定程度上提高绝缘子的沿面耐压

能力,其中后者整体上要优于前者;绝缘子的沿面耐压与三结合处的场强成非线性的反比例关系。

致谢:

该工作在实验设备和样品加工上得到了罗永刚高级工程师、肖明珠博士、游小凤、赵鑫和范玉龙同志的帮助,参加实验的还有唐兵华同志,在此向他们表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 高 巍, 孙广胜, 严 萍. 高真空条件下绝缘闪络机理研究的评述[J]. 高电压技术, 2005, 31(1): 1-4.
- [2] ANDERSON R A. Propagation Velocity of Cathode-initiated Surface Flashover [J]. J. Appl. Phys., 1977(48): 4 210-4 214.
- [3] MILTON O. Pulsed Flashover of Insulators in Vacuum [J]. IEEE Trans. Electrical Insulation, 1972(7): 9-15.
- [4] 雷杨俊, 肖定全. 真空中氧化铝陶瓷表面耐压试验研究[J]. 绝缘材料, 2004(3): 29-35.
- [5] 林惠祖. 真空中绝缘子结构优化设计的理论和方法 [J]. 绝缘材料, 2006, 39(5): 45-49.
- [6] LIU Yuan-shing, ZHANG Guan-jun. Analysis on Surface Charging of Insulator Prior to Flashover in Vacuum [J]. Applied Surface Science, 2004(230): 12-17.
- [7] 高 巍, 孙广胜, 严 萍,等. 纳秒脉冲下真空绝缘沿面闪络特性实验研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 58-61.
- [8] 丁立健, 李成榕, 王景春,等. 真空中绝缘子沿面预闪络现象的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 27-31.
- [9] 雷杨俊, 肖定全. 真空中陶瓷绝缘子的沿面闪络现象及其研究进展[J]. 功能材料, 2003, 34(6): 630-637.
- [10] GOLEN J, KAPERTANAKOS C A. Flashover Breakdown of an Insulator in Vacuum by a Voltage Impulse in the Presence of a Magnetic Field [J]. J. Appl. Phys., 1977 (48): 1 756-1 758.
- [11] 高 巍, 孙广胜, 严 萍,等. 影响真空中绝缘体沿面闪络特性因素研究综述[J]. 高压电器, 2005, 41(6): 456-465.

(上接第 10 页)

抗器电感值的综合公式。最后,以葛南直流输电工程为例,验证了文中所提参数选择方法的合理性。

参考文献:

- [1] 常 浩, 樊纪超. 特高压直流输电系统成套设计及其国产化 [J]. 电网技术, 2006, 30(16): 1-5.
- [2] 浙江大学直流输电科研组. 直流输电 [M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
- [3] 鲍敏铎. 舟山直流输电工程一次主设备技术参数的选择 [J]. 中国电力, 1985(6): 34-40.
- [4] 刘宝宏, 殷威扬, 杨志栋,等. ± 800 kV 特高压直流输电系统主回路参数研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 17-21.
- [5] MELVOLD D J, LONG W F. Back-to-back HVDC System

- Performance with Different Smoothing Reactors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 208-215.
- [6] ARRILLAGA J. High Voltage Direct Current Transmission[M]. 2nd Edition Srrort Rumpress Ltd., 1998.
- [7] 中华人民共和国电力行业标准 DL/T 5223-2005. 高压直流换流站设计技术规定[S]. 2005.
- [8] 任 震, 吴国沛, 戴英筠. 高压直流输电系统平波滤波网络的综合优化[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 65-67.
- [9] PADIYAR K R. HVDC Power Transmission Systems (Technology and System Interactions)[M]. New Delhi, India: Wiley Eastern Limited, 1990.
- [10] 杨汾艳, 徐 政. 直流输电比例-积分控制器的参数优化[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 15-20.