

技术讨论

# 高电压真空灭弧室触头间长间隙的真空绝缘特性

刘志远

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 对高电压真空灭弧室触头间长真空间隙(40 mm 及以上)的真空绝缘特性进行了讨论, 包括击穿电压(直流电压, 工频交流电压和标准雷电冲击电压)与触头开距的关系以及长真空间隙的老炼特性。目前对 72/84 kV 级高电压真空灭弧室触头间范围(40 mm 及以上)的长真空间隙绝缘特性有了一定的了解, 而 126 kV 级高电压单断口真空灭弧室触头间长真空间隙范围(60 mm 及以上)的绝缘特性研究还有待深入开展。

关键词: 真空灭弧室; 真空绝缘; 高电压; 击穿; 老炼

中图分类号: TM241

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)02-0066-04

## Vacuum Insulation Characteristics with Long Contact Gaps between High Voltage Vacuum Interrupter Contacts

LIU Zhi-yuan

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The vacuum insulation characteristics of a long gap (no less than 40 mm) between two contacts in high voltage vacuum interrupters (VIs) are discussed, including the relationship between breakdown voltage (DC voltage, power frequency voltage and lightning impulse voltage) and contact gap, and the conditioning characteristics of long contact gaps in vacuum. The vacuum insulation characteristics of the long gaps with the size of no less than 40 mm in 72/84 kV VIs are hence understood to a certain extent. However, the vacuum insulation characteristics of the long gaps with the size of no less than 60 mm in 126 kV single break VIs still need further investigating.

**Key words:** vacuum interrupters; vacuum insulation; high voltage; breakdown; conditioning

### 0 引言

真空灭弧室有两个显著的发展趋势, 一个是向小型化方向发展, 另一个是向高电压方向发展。在 1997 年通过的《京都议定书》中所指出的 6 种温室效应气体中, SF<sub>6</sub> 气体是温室效应最强的一种, 它的地球温暖化系数是 23 900 (CO<sub>2</sub> 的地球温暖化系数是 1), SF<sub>6</sub> 气体在大气中的寿命是 3 200 年。为了减少 SF<sub>6</sub> 气体温室效应的影响, 国际真空开关领域对真空开关由中压等级向 SF<sub>6</sub> 断路器占据的更高电压等级方向发展非常关注。2006 年在日本松江举办的第 22 届国际真空放电与电绝缘会议上专门设立了“高电压真空开关”讨论组, 讨论了 4 个高电压等级真空开关方面的专题报告<sup>[1-4]</sup>。真空开关向高电压方向发展对真空绝缘性能提出了很高的要求, 需要对真空间隙的绝缘特性有深入的了解。

在真空灭弧室中比较关键的真空绝缘间隙有: 触头间隙; 主触头与主屏蔽罩间隙以及导电杆与主屏蔽罩间隙; 端屏蔽罩与主屏蔽罩间隙及其与绝缘外壳间隙; 真空灭弧室外绝缘间隙, 见图 1<sup>[5]</sup>。由于为沿面间隙, 和均体现为短间隙或短间隙串联, 均已有较好的研究, 故在文中只讨论真空灭弧室触头间隙的真空绝缘特性。

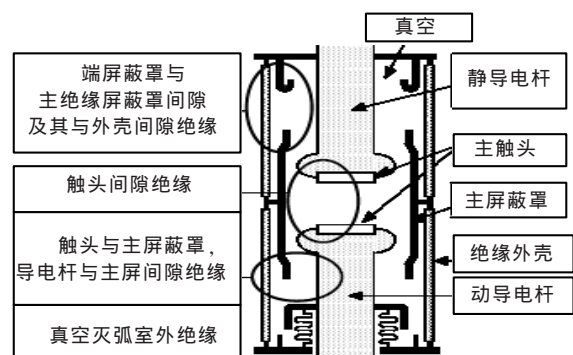


图 1 真空灭弧室中的真空绝缘间隙<sup>[5]</sup>

收稿日期: 2009-02-13; 修回日期: 2009-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50777050)。

作者简介: 刘志远(1971-), 男, 博士, 教授, 研究方向为高电压真空开关, 真空电弧理论和真空绝缘理论。

### 1 长真空间隙

在真空灭弧室设计中为了达到高的耐压水平首先依靠的是增加真空间隙的距离。如在中压真空开关领域,12 kV 真空断路器触头开距为 8~10 mm, 40.5 kV 真空断路器触头开距为 18~20 mm。在高电压真空开关领域,72 kV/84 kV 真空断路器触头开距为 40 mm 左右,126 kV 真空断路器触头开距为 60 mm 左右,而 252 kV 单断口真空断路器触头开距可能在 80 mm 以上。

由于真空开关广泛应用于中压开关领域,因此对 20 mm 及以下的触头间隙真空绝缘特性已经有非常深入地了解<sup>[6-8]</sup>,但是在 72.5 kV 及以上的高电压等级真空开关中,触头间隙进入 40 mm 以上的“长真空间隙”的范围,在此范围内的真空开关触头间隙绝缘特性人们了解得很少。

文中约定在 72.5 kV 及以上的“高电压等级”真空灭弧室中 40 mm 及以上的触头间真空间隙为“长真空间隙”,简称为“长间隙”。

在可拆真空灭弧室中采用平板电极和施加直流电压的实验表明<sup>[9]</sup>,随着真空间隙距离的增加,真空间隙的耐压能力先是线性增加,当开距增加到一定范围后,真空间隙耐压能力的增长进入饱和区,见图 2。进入饱和区后真空间隙耐压能力与开距之间的关系可以表示为  $E_{bd}=kd^{0.91}$ 。而耐压能力与开距之间的具体变化关系受到诸如触头材料、触头表面状况、触头的几何尺寸和几何外形、空间电场分布状况、老炼及电压波形等因素的影响<sup>[10]</sup>。

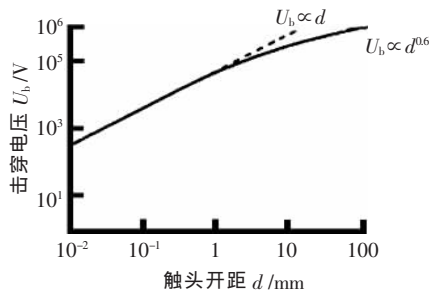


图2 真空间隙平板电极击穿电压  $V_b$  与电极开距  $d$  的关系<sup>[9]</sup> (可拆真空灭弧室,平板电极,施加直流电压)

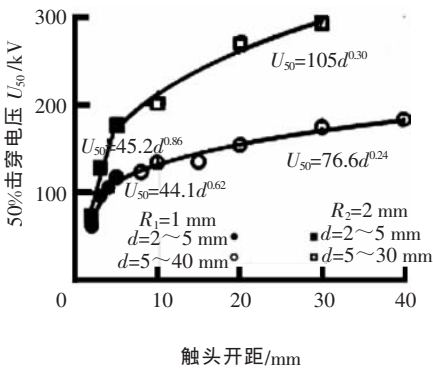
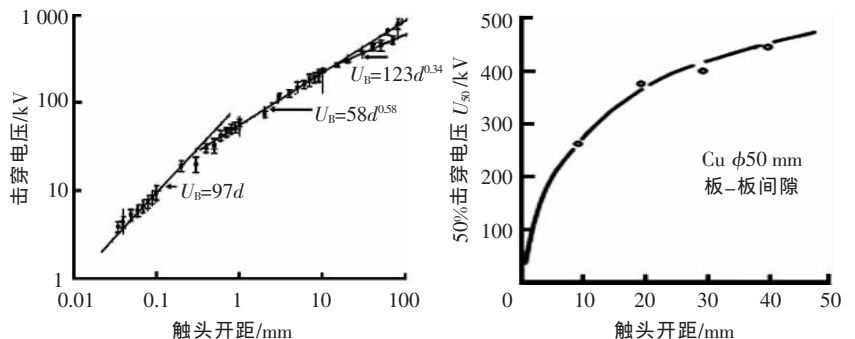


图3 CuCr(棒)-SUS<sub>304</sub>(板)真空间隙击穿特性

### 2 长间隙耐压能力与触头开距的关系

近年来长真空间隙的耐压能力与开距之间的关系成为国际真空绝缘领域的研究热点。文[5,11,12]在 2~50 mm 开距范围内实验研究了棒-板真空间隙耐压能力与开距之间的关系,见图 3。棒和板装在可拆真空灭弧室中,棒为 CuCr 触头材料,其端部半径分别为 1 mm 和 2 mm,板为不锈钢材料 SUS304,对棒端施加负极性的 1.2/50  $\mu$ s 的标准雷电冲击电压。研究表明,在相同的开距下棒的端部半径大时棒-板真空间隙的耐压能力比较高,而且耐压能力随触头开距的增加而增大,在开距为 5 mm 左右出现拐点,这意味着其击穿机理可能发生了改变。文[13]从众多参考文献中总结出板-板电极(均匀场)的直流击穿电压与触头开距的关系,见图 4(a)。在小开距时  $d < 0.4$  mm,击穿电压与开距成正比  $U_B \propto d$ ,在  $0.4$  mm  $< d < 40$  mm 开距范围内  $U_B \propto d^{0.58}$ ,在  $40$  mm  $< d < 100$  mm 开距范围内  $U_B \propto d^{0.34}$ 。文[14]给出了真空灭弧室触头间隙 50%击穿电压  $U_{50}$  与触头开距  $d$  (0~40 mm)的关系,见图 4(b),他们指出当触头开距越大时  $U_{50}$  与  $d$  的关系就越偏离  $U_{50} \propto d^{0.5}$ ,这与文[5]和文[13]得到的结果是一致的。文[15]对单断口和双断口真空灭弧室得到了工频耐受电压以及标准雷电冲击耐受电压与触头开距的关系(单断口 0~50 mm,双断口 0~40 mm),见图 5。对于 84 kV 真空灭弧室,美国国家标准(ANSI)规定的一分钟工频耐受电压为 185 kV,标准雷电冲击电压为 406 kV。由图 5(a)可以看出,当采用单断口时,开距为 20 mm 时即可以满足工频耐受电压 185 kV 的要求;由图 5(b)可以看出,同样采用单断口时,开距需达到 50 mm 时才能满足标准雷电冲击电压 406 kV 的要求。此外文[16]在 0.1 mm~15 cm 的范围内对触头直径为 40 cm 的板-板真空间隙的耐压能力进行了研究,发现存在明显的耐压能力饱和和效应。文[17]在 10~200 mm 的开距范围内对棒-板间隙、板-球间隙、板-棒间隙施加斜波和方波脉冲电压情况下的耐压能力与开距之间的关系进行了研究。



(a) 板-板间隙直流击穿电压

(b) 真空灭弧室触头间隙 50%击穿电压

图4 板-板间隙直流击穿电压、真空灭弧室触头间隙 50%击穿电压与触头开距的关系

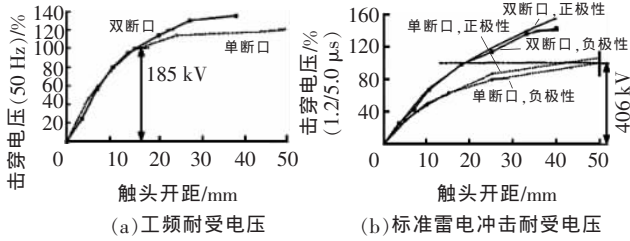


图5 真空灭弧室触头间隙耐受电压与触头开距的关系(单断口与双断口)

### 3 长间隙耐压能力与老炼的关系

文[18]的研究表明,对于 25、30、40 mm 真空间隙,火花老炼可以显著提高真空间隙的耐压能力,并且施加的电压和老炼的开距都对老炼效果产生明显的影响。文[19,20]对 8 mm 和 25 mm 的真空灭弧室触头间真空间隙进行了火花老炼,发现工频火花老炼效果比冲击火花老炼效果好,老炼时的电极开距宜稍大于额定开距,老炼电压值较高时老炼效果好,并分析了放电能量对击穿电压的影响。文[11,12]研究了 2~50 mm 的棒-板真空间隙的老炼特性,研究结果表明,在老炼达到饱和和区后击穿只发生在电场强度大于 30%最大电场强度的区域,并且在 5~50 mm 范围内老炼过程结束后所达到的饱和和击穿电场强度几乎是一个常数,见图 6。

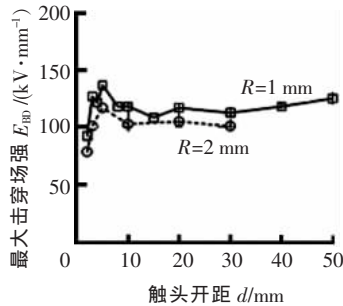


图6 CuCr(棒)-SUS304(板)真空间隙最大击穿场强与开距的关系

### 4 关于长真空间隙绝缘特性与开距关系的讨论

已有的研究结果<sup>[5,11-15]</sup>可以为 84 kV 高电压真空灭弧室触头间长真空间隙(40 mm 及以上)的设计提供参考,但是还不能为 126 kV 等级单断口真空灭弧室触头间长间隙(60 mm 及以上)的绝缘设计提供理论依据。文[5,11,12]研究的是棒-板真空间隙的绝缘特性,不适合用于真空灭弧室触头间的板-板间隙情况。文[13]给出的是直流耐受电压与触头开距的关系,触头距周围的金属外壳较远,而在高电压真空灭弧室中主屏蔽罩距离触头距离相对较近,主屏蔽罩对触头附近的电位线分布有较大影响,另外在真空灭弧室中主要关注工频耐受电压和雷电冲击耐受电压水平,直流耐受电压值仅为参考。文[14]以 84 kV 单断口真空灭弧室为研究目标,其

研究的触头开距范围为大于等于 40 mm,而 126 kV 单断口真空断路器触头开距为大于等于 60 mm。文[15]研究了 84 kV 单断口和双断口真空灭弧室工频耐受电压和标准雷电冲击耐受电压与触头开距(单断口 0~50 mm)的关系,即便当触头开距达到 50 mm 时还不能满足 126 kV 真空断路器的工频耐压(230 kV, 1 min)和标准雷电冲击耐压(550 kV 峰值)的要求。文[16]研究的开距达到 15 cm,但是其研究的触头直径为 40 cm,直径太大,不适合在高电压等级真空灭弧室中应用。文[17]研究的触头开距范围达到 200 mm,但是其施加电压为斜波和方波脉冲电压,而真空灭弧室一般施加电压为工频电压和标准雷电冲击电压。因此对于 126 kV 电压等级单断口真空灭弧室触头间长真空间隙的绝缘特性还有待于进一步的研究和探索,对于长真空间隙击穿特性与触头开距的关系曲线所体现的真空击穿机理有必要进行深入地研究,从而用以提高真空灭弧室触头间隙的耐压性能,达到减小触头开距的目的。

### 5 结语

由上述可知,目前国内外对 72/84 kV 级高压真空灭弧室触头开距范围(40 mm 及以上)的长真空间隙绝缘特性与开距的关系已有了一定的了解,但是还没有关于 126 kV 级高电压单断口真空灭弧室触头间长真空间隙(60 mm 及以上)范围的绝缘特性研究结果。了解和掌握高电压等级真空灭弧室触头间长真空间隙绝缘特性是真空开关从中压领域进入高电压等级领域的一个迫切需要解决的关键问题,研究结果可为高电压等级单断口真空灭弧室的开发提供科学依据。

### 参考文献:

- [1] MSTSUI Y, NAGATAKE K, TAKESHITA M, et al. Development and Technology of High Voltage VCBs: Brief History and State of Art[C]// IEEE 22nd International Symposium On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, 2006: 253-256.
- [2] RENZ R. High Voltage Vacuum Interrupters Technical and Physical Feasibility Versus Economical Efficiency [C]// IEEE 22nd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, 2006: 257-262.
- [3] SCHELLEKENS H, GAUDART G. High-voltage Vacuum Circuit Breaker-a Feasibility Study [C]// IEEE 22nd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, 2006: 263-266.
- [4] WANG Ji-mei, LIU Zhi-yuan, XIU Shi-xin, et al. Development of High Voltage Vacuum Circuit Breakers in China [C]// IEEE 22nd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, 2006: 247-252.
- [5] OKUBO H. Development of Electrical Insulation Techniques in Vacuum for Higher Voltage Vacuum Interrupters[C]// IEEE 22nd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, Japan, 2006: 7-12.

- [6] LATHAM R V. High Voltage Vacuum Insulation: The Physical Basis[M]. London: Academic Press, 1981.
- [7] LAFFERTY J M. Vacuum Arcs Theory and Application[M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [8] BOXMAN R L, SANDERS D M, MARTIN P J. et al. Handbook of Vacuum Arc Science and Technology-fundamentals and Applications [M]. New Jersey: Noyes Publications, 1995.
- [9] LATHAM R V. High Voltage Vacuum Insulation Chapter2: The Operational Characteristics of a High Voltage Vacuum Gap[M]. London: Academic Press, 1981.
- [10] 李震彪, 翁 桅. 开关触头的击穿机理及影响真空间隙击穿的因素[J]. 高压电器, 1996, 32(5): 32-40.
- [11] FUKUOKA Y, YASUOKA T, KATO K, et al. Breakdown Conditioning Characteristics of Long Gap Electrodes in Vacuum [C]// IEEE 22nd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, Japan, 2006: 59-62.
- [12] FUKUOKA Y, YASUOKA T, KATO K, et al. Breakdown Conditioning Characteristics of Long Gap Electrodes in a Vacuum [J]. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 2007: 14(3): 577-582.
- [13] SLADE P G. The Vacuum Interrupter Theory, Design and Application [M]. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008.
- [14] TOYA H, HAYASHI T, YORITA M, et al. Numerical Modeling to Evaluate the Withstand Voltage of a HV Vacuum Interrupter [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989, 24(1): 21-30.
- [15] GIERE S, KARNER H C, KNOBLOCH H. Dielectric Strength of Double and Single Break Vacuum Interrupters[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001: 8(1): 43-47.
- [16] SPOLAORE P, BISOFFI G, CERVELLERA F, et al. The Large Gap Case for HV Insulation in Vacuum [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(4): 389-393.
- [17] EMELYANOV A A. Pulsed Electric Strength of Centimeter Vacuum Gaps [C]// IEEE 22nd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, Japan, 2006: 33-36.
- [18] ZOU Ji-yan, HE Jun-jia, CHENG Li-chun. Improvement of Voltage Withstanding Level of Vacuum Interrupters [C]// IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong, 1993: 338-341.
- [19] 何俊佳, 邹积岩, 程礼椿. 真空灭弧室的火花老炼 [J]. 高压电器, 1994, 30(1): 18-21.
- [20] 何俊佳, 邹积岩, 张汉明, 等. 火花老炼对真空灭弧室绝缘强度的影响[J]. 电工技术学报, 1997, 12(3): 33-36.

(上接第 65 页)

### 3 实验结果分析

为进一步研究重污秽条件下极不均匀污秽电阻对 CVT 分压比影响的程度<sup>[8]</sup>, 笔者对 220 kV 的一体式 CVT 进行了人工污秽试验, 几组实验数据见表 6。

表 6 极不均匀重污秽对 CVT 分压比影响的实验结果

$R_1/M\Omega$	$R_2/M\Omega$	$C/\mu F$	$\Delta U_2/\%$	$\Delta\theta/(\circ)$
2.5	41.0	0.005	0.290	20.9
5.7	40.0	0.005	0.032	28.2
6.0	2.2	0.010	-0.460	23.0
12.0	4.2	0.010	-0.310	15.9

由实验结果可以看出, 当泄漏电流较大、表面污秽电阻较小时, CVT 的电容分压器的分压比会受到影响, 但实际影响程度不像仿真结果那么显著。为保证测量的准确性, 应定时清洗 CVT。

### 4 结论

(1) CVT 分压比的偏差与各节间积污的不均匀度有关, 不均匀度越大, 偏差越大。当污秽电阻降到 5 MΩ 以下, 且不均匀度较大时, 电容分压器幅值和相位的准确性都可能大于规定值。分压比的角度误差往往比幅值的误差还要严重。

(2) 增大电容能改善污秽度对分压比的影响。当 CVT 节数增多时污秽对其测量准确性的影响将变

得更为复杂,  $K_1$  为正、 $K_2$  为负或  $K_1$  为负、 $K_2$  为正时, 可以减小误差。

(3) 试验证明, 在污秽特别严重的地区, CVT 的分压比很有可能受到污秽电阻的影响, 为保证 CVT 测量的准确性, 应定时清洗。

### 参考文献:

- [1] 盛国钊, 倪学锋. 电容式电压互感器 [Z]. 武汉: 武汉高电压研究所, 2002.
- [2] 房金兰, 蔺耀宏. 国内外电容式电压互感器目前水平及发展趋势[J]. 电力电容器, 1999(1): 1-5.
- [3] 关志诚, 崔国颖. 局部表面电导率法及其应用 [J]. 电磁避雷器, 1994(2): 20-24.
- [4] 清华大学, 西安交通大学. 高电压绝缘 [M]. 北京: 电力工业出版社, 1980.
- [5] ZHAO Zi-yu, XIE Heng-kun, ZONG Ren-peng. A Newly Developed Leak Current Monitoring System for the Assessment of Insulator Pollution Severity [C]// IEE transactions on EI, 2006: 319-322.
- [6] SWIFT D A. Flashover of an Insulator Surface in Air Due to Polluted Water Droplets [C]// IEEE Proc. 4th Int. Conf. Properties and Applications of Dielectric Materials, 1994: 550-553.
- [7] 陈耀高, 邓 敏, 林力辉. 高压绝缘子在线监测系统简析[J]. 电网技术, 2001 25(11): 23-26.
- [8] 防污闪技术手册[Z]. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1993.