

高电压真空灭弧室触头间长真空间隙静态绝缘特性研究

刘志远¹, 张颖瑶¹, 林建飞², 姜惟¹, 傅文渊¹, 耿英三¹

(1. 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;

2. 陕西宝光真空电器股份有限公司, 陕西 宝鸡 721006

摘要: 在真空开关向高电压方向发展的背景下, 高电压真空灭弧室触头间长真空间隙的绝缘特性成为关键问题之一。Slade 提出了临界击穿场强理论, 解释了真空中平板电极间直流电压临界击穿场强及其与开距的关系。笔者以临界击穿场强理论为基础, 以 126 kV 真空灭弧室触头间为研究对象, 将临界击穿场强理论应用于长真空间隙 (开距 60 mm) 和交流电压 (工频 50 Hz) 情况下, 得到了高电压真空灭弧室触头间长真空间隙的工频临界击穿场强与触头开距的关系。

关键词: 高电压真空灭弧室; 长真空间隙; 真空击穿

中图分类号: TM56

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2010)01-0009-04

Electric Insulation Characteristics of Long Contact Gap in High Voltage Vacuum Interrupter

LIU Zhi-yuan¹, ZHANG Ying-yao¹, LIN Jian-fei², JIANG Wei¹, FU Wen-yuan¹, GENG Ying-san¹

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

2. Shaanxi Baoguang Vacuum Electric Devices Co., Ltd., Baoji 721006, China)

Abstract: Based on the Slade's critical field theory, we investigate the vacuum insulation characteristics between a pair of contacts in a 126 kV vacuum interrupter. In the case of long vacuum contact gap (60 mm) and AC voltage (50 Hz), we obtain the relationship between critical breakdown field strength and contact gap.

Key words: high voltage vacuum interrupter; long vacuum gap; vacuum breakdown

0 引言

真空灭弧室绝缘设计是真空灭弧室设计工程师非常关心的问题之一。当今真空灭弧室正在向高电压方向发展, 对真空绝缘性能提出了更高的要求。真空灭弧室的绝缘可分为静态绝缘特性和动态绝缘特性。静态绝缘特性是指当一对触头在无载条件下分开一定的开距, 处于静止状态的绝缘特性, 如工频耐压特性和雷电冲击耐压特性。动态绝缘特性是指当一对触头分开时产生电弧, 当电流过零后在暂态恢复电压的作用下真空间隙的耐压特性。笔者只讨论真空灭弧室的静态绝缘特性。在真空灭弧室中有很多可能发生击穿的真空间隙, 包括: 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。笔者着重讨论真空灭弧室触头间隙的击穿特性。

真空灭弧室触头间隙间的击穿机理已经有了大量的研究成果^[1-2]。文[1]指出, 在小开距范围内 ($d \leq 2$ mm) 真空触头间隙的击穿机理主要为场致发射击穿, 在大开距范围内 ($d \geq 5$ mm) 真空触头间隙的击穿机理主要为微粒引发击穿, 击穿电压与触头开距呈指数关系 $V_b \propto d^m$ 。文[2]指出, 真空击穿的物理过程为阴极微突起发射的电子束与阳极材料的相互作用。

虽然了解真空击穿机理有助于真空灭弧室的绝缘设计, 但是真空灭弧室设计工程师关心的是怎样设计可以保证产品的绝缘性能是“安全”的。真空间隙的临界击穿场强理论^[2]可为真空灭弧室的绝缘设计提供参考, 其内容如下:

收稿日期: 2009-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50777050)。

作者简介: 刘志远 (1971—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为高电压真空断路器和真空电弧理论。

考虑到微观场致增强系数 β_m 和宏观场致增强系数 β_g , 在电压 U 的作用下, 开距为 d 的真空间隙中电场强度为

$$E(d) = \frac{\beta_m \cdot \beta_g(d) \cdot U(d)}{d} \quad (1)$$

假设击穿是在一个给定的击穿电压 U_B 的作用下在临界击穿场强达到 E_C 时发生, 则有

$$E_C(d) = \frac{\beta_m \cdot \beta_g(d) \cdot U_B(d)}{d} \quad (2)$$

在真空中平板电极上施加直流电压, 其击穿电压与开距的关系见式(3)

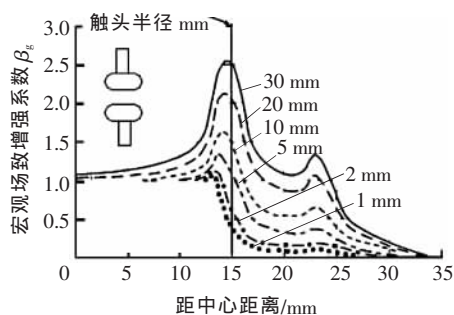
$$U_B(d) = K_2 d^\eta \quad (3)$$

式(3)中, K_2 和 η 为常数(不同开距时其数值不同)。将式(3)代入式(1)中可得

$$E(d) = \beta_m \cdot \beta_g(d) K_2 d^{(\eta-1)} \quad (4)$$

对于一个触头直径为 30 mm 的平板电极, 在触头厚度为 10 mm, 导角半径为 2 mm 的情况下, 通过电场有限元分析可得到不同触头开距时沿触头表面的宏观场致增强系数 β_g 的分布, 见图 1^[2]。由图 1 可知, 当开距为 1 mm 时, $\beta_g(1) \approx 1$ 。对于同一对触头, 在不同触头开距下发生击穿时, 其微观场致增强系数 β_m 变化不大, 因此假设其微观场致增强系数 β_m 为常数, 并由式(4)可得到临界击穿场强与触头开距的关系, 见式(5)。

$$\frac{E_C(d)}{E_C(1)} = \beta_g(d) \cdot d^{(\eta-1)} \quad (5)$$



触头直径—30 mm; 触头厚度—10 mm; 导角半径—2 mm。

图 1 真空中平板电极宏观场致增强系数 β_g 沿触头表面的分布^[2]

由上述临界击穿场强理论可得到真空中平板电极的临界击穿场强与开距的关系。在此基础上, 以 126 kV 高电压真空灭弧室为研究对象, 将该理论应用于触头间长真空间隙(开距 60 mm)和交流电压(工频 50 Hz)情况下进行分析, 从而得到大开距真空间隙下工频电压临界击穿场强与触头开距的关系。

1 有限元仿真

笔者采用 Maxwell 2D 有限元分析软件对真空灭弧室的轴对称电场进行仿真。在计算中采用 126 kV

真空灭弧室的实际尺寸参数, 包括触头轮廓及屏蔽罩等均未简化。由于笔者主要关心触头间隙发生的击穿, 真空灭弧室的外部装置对触头间隙电场分布的影响很小, 只对真空灭弧室的电场进行分析。在一个触头上施加高电位, 另一个触头上施加地电位, 屏蔽罩为悬浮电位。计算场域为关心区域的 6~8 倍。采用自适应网格剖分, 计算误差小于 1%。126 kV 真空灭弧室的等电位线分布的典型结果见图 2。

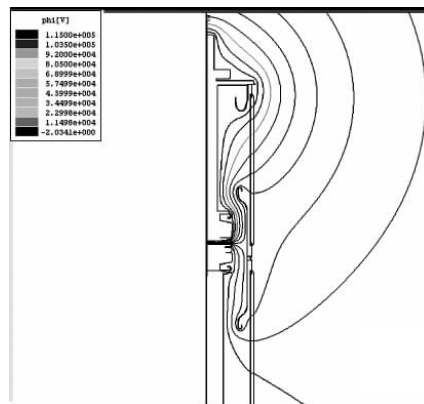


图 2 126 kV 真空灭弧室等电位线分布

2 实验方法

交流电压绝缘强度试验根据试验目的的不同, 试验电压的施加方法主要有三种^[3]。

(1)恒定电压法(恒压法)。根据试验电压, 由低电压开始, 迅速升高电压至试验电压值, 在规定时间内保持电压不变后, 迅速降低电压。耐压试验主要采用这种方法。

GB/T 11022—1999 《高压开关设备通用技术条件》中 6.2.4 条规定了通过试验的判据, 其中包括短时工频耐受电压试验: “如果没有发生破坏性放电, 则应该认为开关设备和控制设备通过了试验”。在 6.2.6.1 条中规定 “开关设备和控制设备应该按 GB/T 16927.1—1997 承受短时工频耐受电压试验。对每一试验状况, 应该把试验电压升到试验值并维持 1 min”。

在文[4]中指出: “交流耐压试验是考验交流设备的基本耐压方式, 适用于不高于 220 kV 的电力设备。它能有效地发现集中性缺陷, 试验进行起来相对比较方便。耐压时间一般是 1 min, 而对 SF₆ 断路器等, 则要求耐压 5 min。”

(2)电压上升法(升压法)。按规定的上升速度增加电压, 直至击穿放电。该方法适用于绝缘击穿试验。

(3)突然加压法(突加法)。突然施加所规定的试验电压, 在规定时间内保持电压不变, 然后迅速降低电压。该方法用于检验短时绝缘强度。

实验采用“恒压法”得到试品的工频耐受电压。试验采用 SBD-300/300 型高压试验变压器,其容量为 300 kVA,最高输出电压为 300 kV,频率为 50 Hz,输入电压为 380 V。实验中先将 126 kV 真空灭弧室拉开一定的开距后放置在一个密封的瓷套中,真空灭弧室垂直于地面。将瓷套抽真空后注入 SF₆ 气体 (0.1 MPa) 作为外绝缘保护。然后对试品在某一开距下从 0 开始施加工频电压并逐渐升高电压,达到某个值后保持 5 min,观察是否发生击穿。在这一开距下,施加不同的电压进行多次实验,发现在某一电压及以下不发生击穿,将该电压称为“工频耐受电压”,当施加电压高于“工频耐受电压”时,试品在 5 min 内可能发生击穿。记录整个试验过程的工频耐受电压。实验中触头开距分别为 6 mm, 12 mm, 18 mm 和 60 mm。

3 有限元分析和工频耐压实验结果

触头开距 6 mm 时的电场强度分布图见图 3。由于触头直径为 100 mm,远远大于触头开距,触头间隙的电场强度均匀分布。在此开距下触头表面的宏观场致增强系数 β_g 的最大值为 1.156。在上述 Slade 提出的临界击穿场强理论中指出,当开距为 1 mm 时, $\beta_g(1) \approx 1$ 。因此能够将 $d=1$ mm 作为基准。在后续的推导中,由于触头开距为 6 mm 时, $\beta_g(6) \approx 1$,也近似为常数,可取 $d=6$ mm 作为基准。



图3 触头开距 6 mm 时的电场强度分布

不同触头开距下的工频耐受电压实验结果见表 1。当触头开距分别为 6 mm, 12 mm, 18 mm 和 60 mm 时,其工频耐受电压对应为 130 kV, 170 kV, 195 kV 和 245 kV。在相应的触头开距和工频耐受电压作用下,计算真空灭弧室触头间隙的电场强度,约定其最大电场强度为耐受场强。当触头开距分别为 6 mm, 12 mm, 18 mm 和 60 mm 时,其工频耐受场强为 2.51×10^7 V/m, 1.70×10^7 V/m, 1.37×10^7 V/m 和 8.08×10^6 V/m。

表 1 工频耐受电压实验结果

项目名称	开距/mm			
	6	12	18	60
耐受电压/kV	130	170	195	245
耐受场强/(V·m ⁻¹)	2.51×10^7	1.70×10^7	1.37×10^7	8.08×10^6

4 临界击穿场强分析

由上述分析可知,126 kV 真空灭弧室触头间隙击穿的临界击穿场强分析基准点定在 6 mm。由式 (4) 可知,在不同触头开距时的临界击穿场强与 6 mm 开距时的临界击穿场强之比为

$$\frac{E_C(d)}{E_C(6)} = \frac{k(d)}{k(6)} \cdot \frac{\beta_g(d) \cdot d^{\eta(d)-1}}{\beta_g(6) \cdot d^{\eta(6)-1}} \quad (6)$$

前述的临界击穿场强理论^[2]为施加直流电压的情况,其系数 k 与 η 的取值为直流耐压情况的数值。为得到工频电压情况的系数 k 与 η 的取值,采用了文[5]所得到的工频击穿电压与开距关系。文[5]采用工频变压器对真空灭弧室试品进行实验。将真空灭弧室放置在瓷套中。瓷套中充有一定压力的绝缘气体对真空灭弧室的外绝缘进行保护。真空灭弧室分为单断口和双断口两种,单断口真空灭弧室开距最大为 50 mm。采用了其单断口工频击穿电压与开距关系的实验数据,见图 4。通过对图 4 数据进行拟合,得到公式 $U_B = k_d d^\eta$ 中的系数 k 与 η 的取值见表 2。

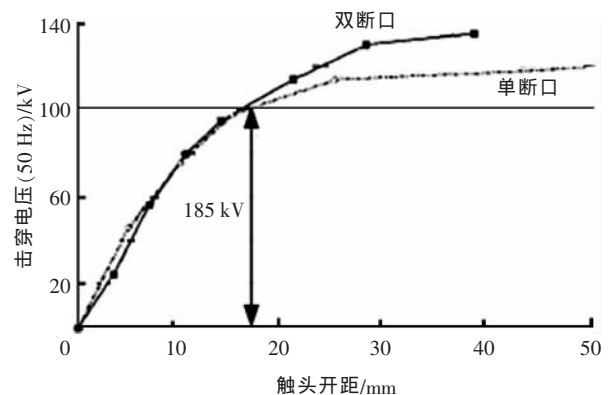


图4 Giere 等得到的真空灭弧室触头间隙工频击穿电压与触头开距关系^[5]

表 2 由图 4 数据拟合得到公式 $U_B = k_d d^\eta$ 中的系数

开距 d /mm	k_d	η
0-15	29.19	0.675 6
15-25	71.42	0.333 8
25-50	173.57	0.065 1

注:公式 $U_B = k_d d^\eta$ 中, U_B —击穿电压(kV), d —触头开距(mm), η —常数, k_d —常数(kV/mm ^{η})。

根据 Slade 提出的临界击穿场强理论^[2],采用如下方法得到最大宏观场致增强系数 β_g 与开距 d 的

关系见(式(6))。计算得到 126 kV 真空灭弧室触头间隙的电场强度分布见图 3。然后根据电场强度计算结果得到如图 1 所示的阴极表面场强分布。由图 1 可知阴极表面的场强分布是不均匀的,从而得到该触头开距下的最大宏观场致增强系数 β_g 。改变不同的触头开距进行计算,直至触头开距达到 60 mm,得到最大宏观场致增强系数 β_g 与开距的关系,见图 5。

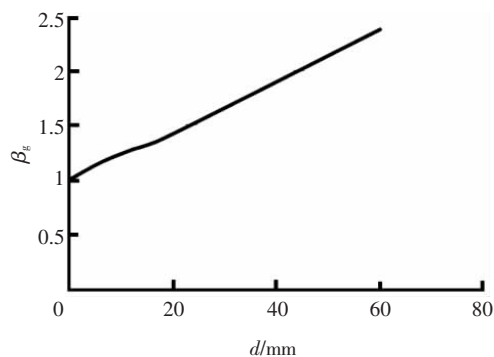


图 5 126 kV 真空灭弧室触头间隙最大宏观场致增强系数 β_g 与开距 d 的关系

将表 2 和图 5 中所得到的数据代入式(6)中,可得到 126 kV 真空灭弧室在不同触头开距下的临界击穿场强理论计算值见表 3。图 6 将表 3 中 126 kV 真空灭弧室工频临界击穿场强计算值与工频耐受场强实验值(表 1)进行对比,在触头开距为 6 mm, 18 mm 和 60 mm 时,工频耐受场强实验值分别比工频临界击穿场强计算值低 13%, 18% 和 23%。作者认为 Slade 提出的临界击穿场强概念应对应于“升压法”^[3]所得到的实验数据,即击穿电压。在进一步的工作中,作者将采用“升压法”得到的击穿电压对临界击穿场强理论进行实验验证。

5 结语

以临界击穿场强理论为基础,以 126 kV 真空灭弧室触头间隙为研究对象,将临界击穿场强理论应用于长真空间隙(开距 60 mm)和交流电压(工频

表 3 临界击穿场强理论计算结果

项目名称	触头开距/mm			
	6	12	18	60
拟合 k 值	29.19	29.19	71.42	173.57
拟合 η 值	0.675 6	0.675 6	0.333 8	0.065 1
β_g 值	1.156	1.271 6	1.373	2.376
临界击穿场强/($V \cdot m^{-1}$)	2.51×10^7	1.95×10^7	1.68×10^7	1.05×10^7

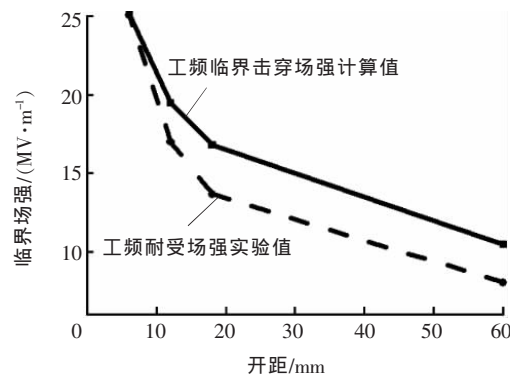


图 6 126 kV 真空灭弧室工频临界击穿场强计算值与工频耐受场强实验值

50 Hz)情况下,得到了高电压真空灭弧室触头间长真空间隙的工频临界击穿场强与触头开距的关系。

参考文献:

- [1] LATHAM R V. High Voltage Vacuum Insulation: the Physical Basis[M]. London: Academic press, 1981.
- [2] SLADE P G. The Vacuum Interrupter Theory, Design and Application[M]. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008.
- [3] 中野义映. 高电压技术[M]. 张乔根, 译, 北京: 科学出版社, 2004: 185-190.
- [4] 梁曦东, 陈昌渔, 周远翔. 高电压工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 127.
- [5] GIÈRE 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.

(上接第 8 页)

- [6] REY J M, MARINOV D, VOGLER D E, Sigrist M W. Investigation and Optimisation of a Multipass Resonant Photoacoustic Cell at High Absorption Levels[J]. Appl. Phys. B, 2005, 80: 261-266.
- [7] SIGRIST M W. Trace Gas Monitoring by Laser Photoacoustic Spectroscopy[J]. Infrared Physics & Technology, 1995, 36(1): 415-425.
- [8] SCHIT S, THEVENAZ L, NIKDES M, et al. Ammonia Monitoring at Trace Level Using Photoacoustic Spectroscopy in In-

dustrial and Environmental Applications[J]. Pectroschimica Acta-Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2004, 60(14): 3 259-3 268.

- [9] WILLIAM B, ZIMMERMAN J. COMSOL Multiphysics 有限元法多物理场建模与分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [10] BREWER R J, BRUCE C W, MATER J L. Optoacoustic Spectroscopy of C_2H_4 at the 9- and 10- μm $C^{12}O_2^{16}$ Laser Wavelengths[J]. Appl. Opt. 1982, 21: 4 092-4 100.