

高压开关断路器用灭弧喷口材料 电气强度测试条件研究

朱琦琦, 陈蕊, 郝留成, 袁端鹏, 李凯, 王亚祥, 司晓闯, 张佩
(平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 为了明确灭弧喷口材料电气强度的测试条件, 本研究利用 COMSOL 有限元分析软件, 建立了喷口材料电气强度测试模型, 仿真计算了不同电极形状、环境介质、试样厚度下测试模型的静电场分布。结果表明: 球形电极、等径电极优于非等径电极, 环境介质采用变压器油最优, 试样厚度采用 1 mm 较优。对比采用球形电极、等径电极在变压器油中对 1 mm 厚的喷口材料试样电气强度测试结果, 采用球形电极时测得试样的电气强度较高且分散性更小, 标准差仅为 1.172 kV/mm。研究结果为喷口材料电气强度测试条件的选择提供了理论依据。

关键词: 灭弧喷口; 电气强度; 电极; 环境介质; 试样厚度

中图分类号: TM206 文献标志码: A 文章编号: 1009-9239(2022)07-0099-05

DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.07.015

Research on Test Conditions of Electric Strength of Arc-extinguishing Nozzle Materials for High Voltage Switch Circuit Breaker

ZHU Qiqi, CHEN Rui, HAO Liucheng, YUAN Duanpeng,
LI Kai, WANG Yaxiang, SI Xiaochuang, ZHANG Pei
(Pinggao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China)

Abstract: In order to clarify the electric strength test conditions of arc-extinguishing nozzle materials, an electric strength test model of nozzle materials was established by using COMSOL finite element analysis software, and the electrostatic field distribution of the test model were calculated under different electrode shapes, environmental media, and sample thicknesses. The results show that the spherical electrodes and equal-diameter electrodes are better than non-equal-diameter electrodes, the best environmental media is transformer oil, and the sample thickness of 1 mm is better. By comparing the electric strength test results of the nozzle material samples with 1 mm of thickness in transformer oil measured with spherical electrodes and equal-diameter electrodes, it is found that the electric strength of the samples measured with spherical electrodes is higher, and the dispersion is smaller, the standard deviation is only 1.172 kV/mm. The research results provide a theoretical basis for the selection of electric strength test conditions for nozzle materials.

Key words: arc-extinguishing nozzle; electric strength; electrode; environment medium; sample thickness

0 引言

在电网运行和用电调度过程中, 高压开关设备承担着开断电力系统某些元件的作用, 开断电流越

大, 电弧燃烧越强烈, 电弧熄灭需要的时间就越长, 电弧燃烧产生的热量和气体电离就越多, 严重威胁高压开关设备的正常工作和服役寿命。高压开关设备一般通过灭弧介质和灭弧喷口来减小这种危害^[1-4]。

灭弧喷口作为高压开关设备灭弧装置中控制电弧、创造高速气吹条件的核心绝缘部件, 在开断

收稿日期: 2022-02-22 修回日期: 2022-03-28

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5500-202055098A-0-0-00)

作者简介: 朱琦琦(1982-), 男(汉族), 安徽宿州人, 高级工程师, 博士, 主要从事高压开关设备的制造研究工作。

过程中起着极为重要的作用。随着高压开关朝高电压、大容量和小型化方向的发展,断路器断口数量的减少以及开断电弧能量的增大使其对喷口电气性能和力学性能的要求越来越高^[5-6]。绝缘对电气设备至关重要,电气击穿往往会导致开关设备受到损伤,因此准确测试灭弧喷口材料的电气强度具有重要的实际意义。目前对灭弧喷口材料的耐烧蚀性^[7-10]、力学性能^[11-14]、制造技术^[15-19]等研究较多,但对于喷口材料电气强度测试条件的研究较少,而测试条件的改变往往导致测试结果差异较大,如采用薄膜所测电气强度远高于采用薄片(1 mm厚)所测电气强度。

灭弧喷口材料电气强度测试主要依据 GB/T 1408.1—2006《绝缘材料电气强度试验方法 第1部分:工频下试验》,该标准是针对固体绝缘材料工频短时电气强度测试的通用标准,推荐了固体绝缘材料电气强度测试的各种条件,但对于喷口用聚四氟乙烯类材料,各试验条件对测试结果的影响并不明确。

本文首先利用 COMSOL 有限元分析软件,建立灭弧喷口材料电气强度测试模型,仿真分析电极类型、试验环境、试样厚度对喷口材料电气强度测试结果的影响,并进行试验验证,为灭弧喷口材料电气强度测试条件的选择提供依据。

1 仿真及实验方法

1.1 实验方案

电气强度测试设计的电极尺寸如表1所示,仿真计算和实际测试时喷口材料试样与电极的位置关系如图1所示,仿真计算时采用的喷口材料试样尺寸为 $\phi 100\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 、 $\phi 100\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 、 $\phi 100\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 共3种规格,喷口材料电气强度测试时采用的试样尺寸为 $\phi 100\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。

1.2 仿真模型建立

仿真计算采用 COMSOL 的 AC/DC 模块中的二维轴对称结构,网格划分采用软件预定义的超细化构建方式,最小单元尺寸为 $0.004\ 57\text{ mm}$ 。

仿真计算时设定电极、试样的各项参数,在电极高压端施加 $0\sim 30\text{ kV}$ 的电压,得到各个电压下电场的分布。

1.3 电气强度试样制备

试验用喷口材料试样由棒材机加工而得,棒材尺寸为 $\phi 120\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 。棒材的制备流程如图2

表1 喷口材料电气强度测试电极尺寸

Tab.1 The electrode size of electric strength test for nozzle materials

电极	尺寸/mm	
球形电极	上电极	$\phi 12.5$
	下电极	
不等径电极	上电极	$\phi 25 \times 25$
	下电极	$\phi 75 \times 15$
等径电极	上电极	$\phi 25 \times 25$
	下电极	

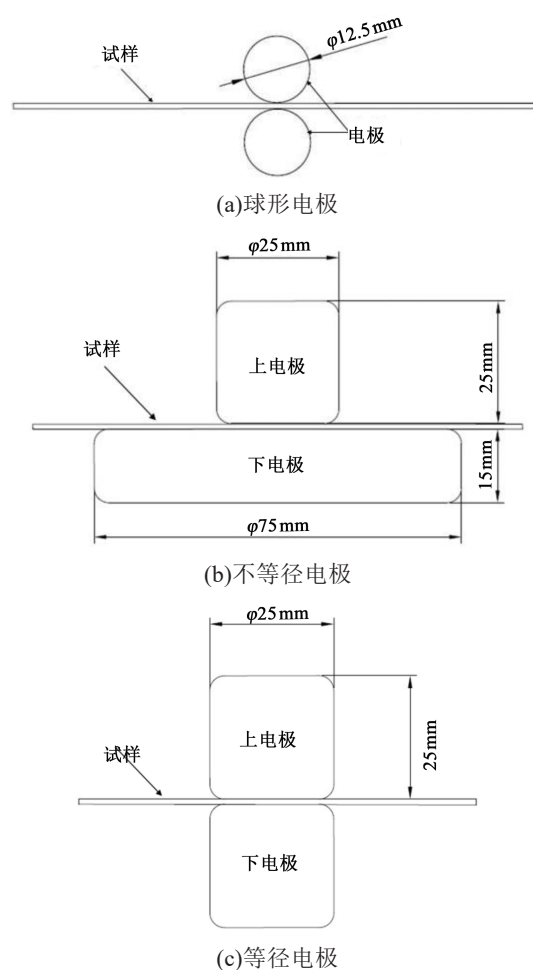


图1 测试电极与试样的位置关系

Fig.1 The position relationship between test electrode and sample

所示,首先对氮化硼、PTFE 粉末分别进行预处理,以除去填料中的水分和 PTFE 粉末中的大尺寸聚合物,然后按设定比例,将 PTFE 粉末和填料氮化硼在三维混合器中混合,得到均匀的混合粉末;将混好

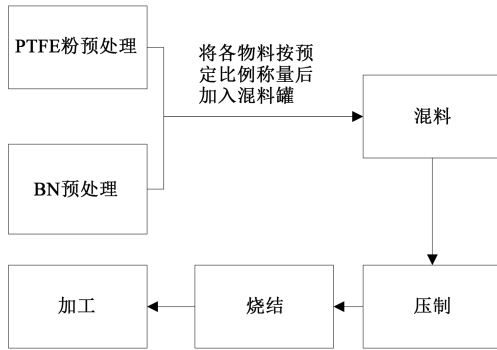


图2 试样制备流程

Fig.2 The preparation process of sample

的粉末装入钢模中,用电子压力机以一定的速率压制样品,成型压力为30~50 MPa,保持时间为3~10 min;脱模后,将样品放入烧结炉的旋转盘上进行烧结,烧结曲线如图3所示,当炉温按照设定程序降至180℃后,随炉冷却至60℃以下再打开烧结炉取出样棒。最后采用数控车床对样棒进行机加工,试样尺寸为 $\phi 100\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,试样形态如图4所示。

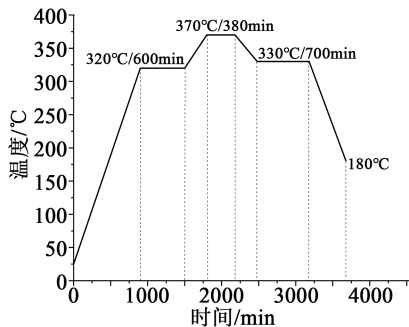


图3 样棒烧结曲线

Fig.3 The sintering curve of sample



图4 机加工所得喷口材料试样

Fig.4 The machined nozzle material sample

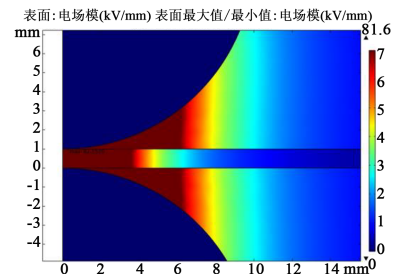
1.4 电气强度测试

将试样、电极安装好并放置在变压器油中,采用变压器以2 kV/s的升压速率对试样施加电压,直至试样发生击穿。试样发生击穿时的施加电压与试样厚度的商即为试样的电气强度。

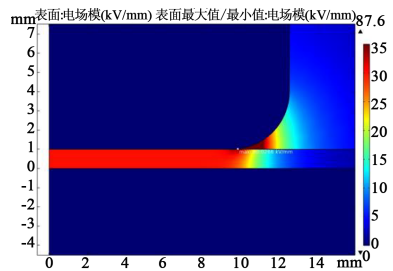
2 仿真结果分析

2.1 不同电极结构作用下的静电场仿真结果

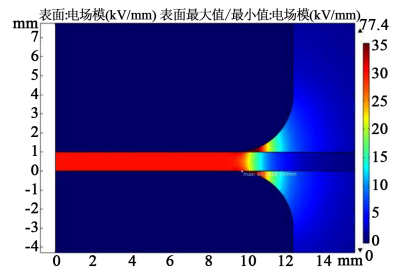
针对 $\phi 100\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 尺寸的试样,在空气介质中,分别使用球电极、非等径电极、等径电极施加30 kV电压,各电极结构下的静电场分布如图5所示,其电场强度最大值依次为82.143、90.027、80.163 kV/mm。



(a)球电极



(b)不等径电极



(c)等径电极

图5 不同电极结构下的静电场分布图

Fig.5 The electrostatic field distribution under different electrode structures

由仿真结果可知,无论采用何种电极,其电场强度的最高点均在三相点(试样、电极和环境介质交界处)的位置,其中以不等径电极结构三相点处电场强度最高,这是因为电极表面的电场强度与其表面的电荷密度成正比,电极边缘处的曲率半径越小,电荷密度越大,故在电极边缘处场强较高。同时,采用球电极时试样上分布的电场强度与三相点处的电场强度最大值相差不大,而采用等径电极与非等径电极时试样上分布的电场强度均远低于三

相点处的电场强度最大值。为了保证测试时击穿发生在试样上,需要选择电气强度较高的环境介质,如果选择的环境介质电气强度低,在测试时会发生介质比试样提前击穿的情况,不能真正考核到试样的绝缘性能。

综上,推荐使用球形电极和等径电极进行喷口材料电气强度的测试。

2.2 不同环境介质对静电场分布影响的仿真结果

以球电极为例,针对 $\phi 100\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 尺寸的试样,分别以空气、 SF_6 、变压器油作为环境介质对喷口材料进行静电场分布测试。在施加 $0\sim 30\text{ kV}$ 电压的过程中,3种环境介质中测试装置电场最大值均在三相点处,电场最大值随施加电压的变化如图6所示。

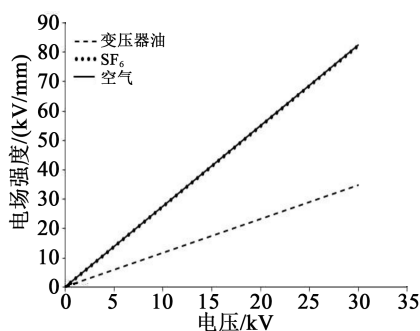


图6 不同环境介质下电场最大值-电压关系曲线

Fig.6 The maximum electric field-voltage curves under different environmental media

由图6可知,采用 SF_6 和空气为环境介质时所得的电场最大值-电压关系曲线重合;同一电压下,采用变压器油为环境介质时所得的电场最大值较小,而采用空气、 SF_6 为环境介质时所得的电场最大值较大。

对喷口材料进行电气强度测试时,如果选用试验介质的电气强度较低,喷口试样击穿之前可能发生介质的局部介电击穿,因此必须选用电气强度较高的媒介。 SF_6 气体与变压器油的电气强度均高于空气,且空气、 SF_6 的电气强度与气压、温度等密切相关^[3,17],从操作的简便性及环保性考虑,喷口材料电气强度测试用环境介质宜采用变压器油。

2.3 不同试样厚度对静电场分布影响的仿真结果

以变压器油为介质,采用球电极分别对 $\phi 100\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 、 $\phi 100\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 、 $\phi 100\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 尺寸的试样进行静电场分布计算。根据电场强度概念及喷口材料电气强度指标要求,若喷口材料的电气强度为 30 kV/mm ,则对厚度为1、2、4 mm试样分别

施加30、60、120 kV的电压,各击穿电压下测试装置的静电场分布如图7所示,1 mm试样下的电场强度最大值为 34.64 kV/mm ;2 mm试样下的电场强度最大值为 35.85 kV/mm ;4 mm试样下的电场强度最大值为 38.6 kV/mm 。

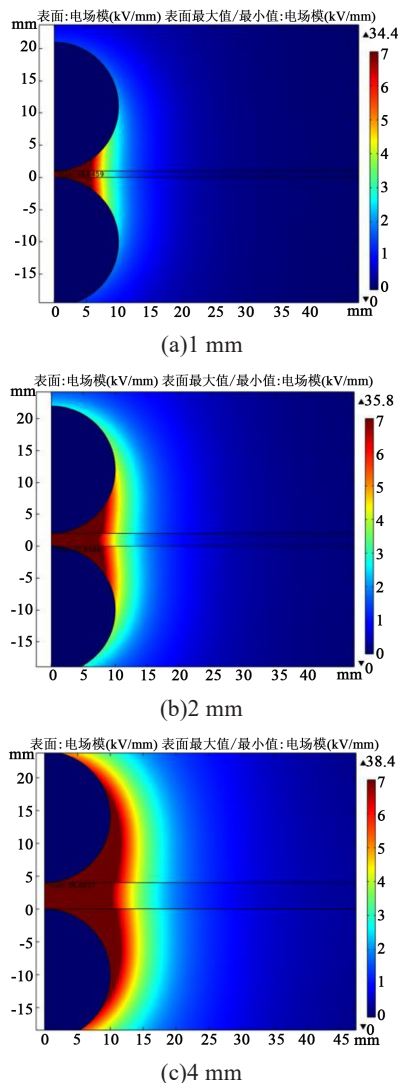


图7 采用不同厚度试样时静电场分布图

Fig.7 The electrostatic field distribution diagram of samples with different thickness

而电气强度为材料的一种属性,随着试样厚度的增加,两电极间的距离增大,击穿电压增大,但在各击穿电压下的电场强度分布相差不大,从对试验设备参数要求及操作安全性等方面考虑,推荐使用1 mm厚的试样对喷口材料电气强度进行测试。

3 喷口材料电气强度测试

针对由同一批棒材制备的 $\phi 100\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 试样,以变压器油为试验介质,以 2 kV/s 的升压速度,

分别采用球形电极和等径电极对喷口材料进行电气强度测试,结果如表2所示。

表2 不同电极下喷口材料电气强度测试结果

Tab.2 The electric strength test results of nozzle materials under different electrodes

电极	电气强度 /(kV/mm)	平均值 /(kV/mm)	标准差 /(kV/mm)
球形电极	45.71、43.42、43.81、 42.67、44.67	44.05	1.172
等径电极	43.15、37.5、41.89、40.5、 38.75、34.6	39.40	3.120

从表2可知,采用球形电极测得的电气强度高于等径电极的测试结果,且球形电极测试值的分散性相对较小。这是因为球形电极间的试样面积较小,而等径电极间的试样面积较大,试样面积越大,试样上存在缺陷的概率也越大,在电气强度测试时可能会在缺陷处发生击穿,从而导致测试结果偏低且测试结果不能真正反映材料的性能。

4 结论

(1)球电极、等径电极、非等径电极下施加相同测试电压时,3种电极下静电场分布中的最大场强均在三相点处,其中以非等径电极的场强最大。

(2)采用同一种电极,以空气、SF₆、变压器油作为环境介质时,其静电场分布的最大场强均在三相点处,其中以变压器油的场强最低,空气与SF₆的场强较高,试验时极易导致介质先于试样击穿。

(3)击穿试验时,试样越厚,击穿所需电压越高,对试验设备要求就更高,综合考虑,推荐使用1 mm厚的试样。

(4)以变压器油为试验介质,分别采用球形电极和等径电极对1 mm厚喷口材料进行电气强度测试,球形电极测得的电气强度值偏高,相对于等径电极测得的电气强度值提高了约10%,且标准差更小,仅为1.172 kV/mm,从制样要求、测试结果稳定

性方面来讲,采用球形电极更优。

参考文献:

- [1] 杨倩颖,李心如.基于喷口射流的强气流灭弧防雷装置的分析与研究[J].电工技术,2021(3):151-154,157.
- [2] 韩书谟,徐国政,唐冬之,等.自能式SF₆断路器开断过程的分析[J].清华大学学报,2000,40(7):8-11.
- [3] 黎斌.SF₆高压电器设计[M].北京:机械工业出版社,2003(1):5-11,82-88.
- [4] 张俊民.SF₆自能膨胀式断路器开断大电流过程的数值模拟与分析[J].电工技术学报,2004,19(9):6-9,17.
- [5] 钟建英,陈刚,谭盛武,等.高压开关设备关键技术及发展趋势[J].高电压技术,2021,47(8):2769-2782.
- [6] 张猛.高压开关设备[M].北京:中国电力出版社,2021:3-23.
- [7] 李卫国,焦彦俊.大容量断路器喷口材料烧蚀性能的试验研究[J].绝缘材料,2016,49(3):64-67.
- [8] 邢照亮,焦彦俊,张翀,等.断路器喷口材料PTFE耐烧蚀性能的研究[J].高压电器,2017,53(2):154-158.
- [9] 李仰平,张建宏,刘泽响,等.高压SF₆断路器喷口烧蚀特性的模拟研究[J].西安交通大学学报,2002,36(8):785-788.
- [10] 张耀东,李程,姬瑞磊,等.PTFE复合体系电弧作用机理探讨及电气性能研究[J].湖北电力,2018,42(5):29-33.
- [11] 张娜娜,王宁,侯亚峰,等.灭弧喷口材料低温性能[J].上海塑料,2021,49(5):40-43.
- [12] 吴明清,卢银花,吕敏,等.外形结构对聚四氟乙烯喷口表面应力及性能的影响[J].绝缘材料,2020,53(12):103-107.
- [13] 刘晓明,朴文泉,曹云东,等.喷口结构对超高压SF₆断路器压力特性的影响[J].高电压技术,2011,37(12):3093-3098.
- [14] 王宁,张娜娜,侯亚峰,等.BN/PTFE喷口复合材料力学性能及失效机理研究[J].化学推进剂与高分子材料,2021,19(4):46-50.
- [15] 袁端鹏,林生军,郝留成,等.混料方式对聚四氟乙烯灭弧喷口性能的影响研究[J].绝缘材料,2015,48(3):55-59.
- [16] 袁端鹏,罗军,郝留成,等.基于AlN填料的SF₆断路器用耐烧蚀灭弧喷口材料性能研究[J].绝缘材料,2019,52(9):30-35.
- [17] 袁端鹏,陈蕊,郝留成,等.成型工艺对高压开关灭弧喷口的性能影响研究[J].绝缘材料,2019,52(10):41-45.
- [18] 杨保利,吴明清,张佩,等.烧结工艺对聚四氟乙烯喷口制品性能的影响[J].绝缘材料,2018,51(10):45-49.
- [19] 赵训君.纳米改性喷口材料PTFE耐烧蚀性能的研究[J].绝缘材料,2016,49(10):60-64.
- [20] 姚志松,姚磊,等.变压器油的选择、使用和处理[M].北京:机械工业出版社,2007:21-26.