

[高压开关]

高压开关电弧试验样机研制

文/弋江森¹ 常治国¹ 赵培²

1. 西安西电开关电气有限公司; 2. 西安高压电器研究院股份有限公司

依据高压开关电弧关键特性参数测量需求，研制的试验样机可满足电弧宏观、微观方面测量，有助于掌握环保气体电弧的开断特性。对于增强环保气体电弧基础研究领域的研究能力，促进环保气体在高压开关产品的应用均有重要意义。

六氟化硫（SF₆）是一种强温室效应气体，其全球变暖潜能指数（GWP）为CO₂的23 900倍，被广泛应用于高压电器设备。大量使用SF₆将会带来严重的温室效应，绿色高压电器设备成为近年来的研究热点^[1]。随着环保气体在高压开关中的应用不断深入，行业内以C₄F₇N混合气体为代表的环保气体的物性参数、临界击穿场强数据、开断特性计算方法尚有所欠缺，现有的仿真计算是建立在部分假设的基础上，有较大的近似性，所以高压开关电弧仿真的准确性还不高，分析方法的可靠性与有效性仍需进行理论与试验验证。为进一步了解电弧特性，需要研制专用试验样机开展气体电弧试验，对燃弧过程中电弧关键特性参数进行测量，为环保气体断路器设计提供一种高效的手段，这已成为学界和业界开展电弧研究的重要手段^[2-9]。

电弧研究试验样机的研制

1. 试验样机的总体设计

试验样机的研制包括断路器灭弧室零件设计、灭弧方案设计、传动方案设计、整机结构设计和传感器安装方案设计等，试验样机需满足以下技术要求^[10]。

1) 试验样机为单相罐式断路器，为了便于测量采用卧式结构。

2) 优选尺寸较小、充气量较少的断路器进行优化设计。

3) 由于仅测量电弧参数，因此电流通路可只设计弧回路，无需主导电回路。

4) 灭弧室为特殊设计（双动压气式）：一侧为动触头侧，动触头部件作为运动部件和操动机构连接；另一侧为压气侧，压气缸前端的大、小喷口与自力触头保持不动，压气活塞作为运动部件和操动机构连接。双侧速度都可以调整。

5) 灭弧室可测量气流场压力，并且壳体设计要设计对应接口便于压力传感器耦合。

6) 壳体设置观察窗用于观测电弧。

试验样机设计框架图如图1所示。

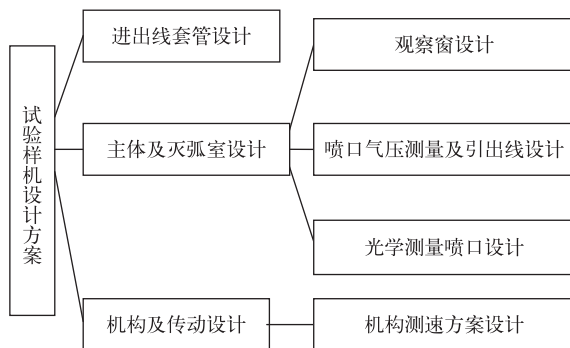


图1 试验样机设计框架图

2. 进出线套管设计

进出线套管结构如图2所示，由板式绝缘子、分支筒、导体触头部件和复合套管组成，内部为封闭气室。试验过程中充入0.3~0.6 MPa N₂作为绝缘气体，在试验样机检修过程中作为整体便于拆装。

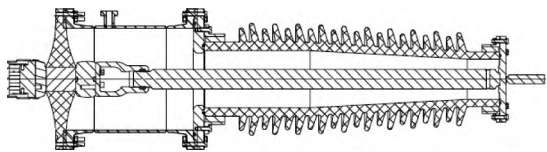


图2 套管结构

3. 主体及灭弧室设计

试验样机主体根据测量要求进行优化设计，结构如图3所示。

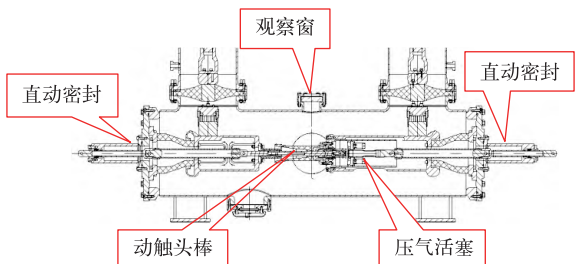


图3 断路器结构

试验样机被板式气绝缘子分隔为3个气室，其中灭弧室所在罐体气室可充入不同种类、气压的环保气体进行试验研究。

灭弧室为双动压气式设计，左侧为动触头侧，直动密封拉杆带着动触头经由导向部件做直线运动，导向部件前端装有表带触指作为导电元件；右侧为压气侧，内部有带安全阀的压气活塞，前端固定安装灭弧室喷口及自力弧触头。

断路器分闸时左侧机构带动动触头部件向左运动，右侧机构推动压气活塞同样向左运动，压缩气体从喷口间隙流向喉道进行灭弧。合闸时运动方向相反。

(1) 观察窗设计

试验样机中段设有三个观察窗位置，设置有前后两个大观察窗，上方1个小观察窗，正对灭弧室大喷口喉道位置，如图4所示。为保障人员安全，特别加装锥筒防护罩，防护罩前端设计对应开口可进行电弧影像拍摄和光学测量，同时也能够为操作人员提供防护。

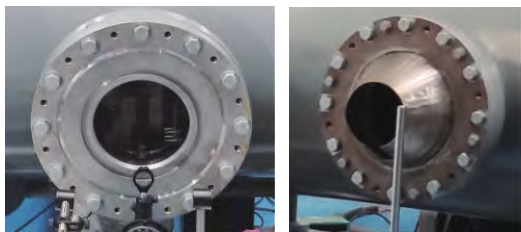


图4 观察窗

(2) 喷口气压测量及引出线的设计

采用压阻式压力传感器测量气流场压力，为避免高速运动的喷口对气压测量造成影响，将喷口设计成固定安装形式，在喷口外壁设计平面并有对应的孔位用于安装导气管与传感器，如图5所示。

传感器设计在断路器罐体内部，信号向外传输需经过罐体外壳，特别在罐体一侧设计了支筒，支筒法兰设计开孔用于安装电连接器，将其作为信号传输的过渡元件，如图6所示。

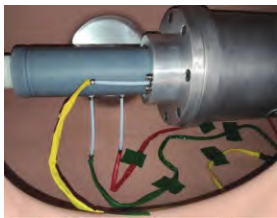


图5 喷口气压测量及传感器



图6 气压测量信号引出

(3) 光学测量喷口设计

为拍摄动态电弧，设计石英玻璃材质的大喷口直接替换聚四氟乙烯大喷口，如图7所示。

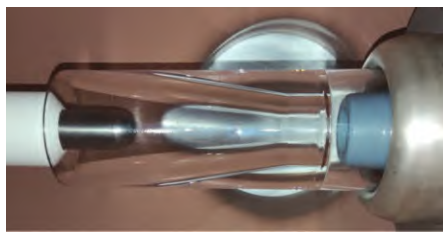


图7 石英玻璃大喷口

4. 机构及传动设计

试验样机左侧为电动机构带着动触头部件运动，机构输出轴经传动拐臂和连板连至拉杆，电动机构转速可通过软件调节，可按试验需求设置动触头部件运动特性。

试验样机右侧过程中需要克服活塞与直动密封的摩擦力以及压气时的压气反力，选用液压簧机构来确保足够分闸操作功，机构输出轴经过传动拐臂和连板使运动反向。

试验样机为电动机构和液压机构双侧驱动，需要在两侧各设置一个测速器。根据试验样机结构特点和两侧动作行程，选择安装直线测速器，并专门设计安装弯板将其安装在直动密封装配的端面法兰上，通过活塞杆尾部轴销的运动带动测速器滑块移动，如图8所示。



(a) 液压机构侧



(b) 电动机侧

图8 测速器安装

试验样机

本文研制的试验样机如图9所示。套管充气最高压力为0.6 MPa，灭弧室所在断路器罐体容积约为 0.4 m^3 ，试验样机可充入 SF_6 、 N_2 和 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 混合气体等气体，罐体内部最高充气压力为0.4 MPa，压气侧活塞行程170 mm，动触头侧触头行程210 mm，平均分闸速度为 $6.5\sim 7.5\text{ m/s}$ ，分闸时间为 $27\sim 31\text{ ms}$ ，设计开断电流最高为30 kA。



图9 试验样机

结束语

本文成功研制接近工程样机结构的环保气体电弧试验样机，实现燃弧过程可观测，满足电弧形态拍摄和关键特性参数测量的需求，有助于建立环保气体电弧开断模型，为充分开展气体电弧研究测试创造有利条件。EA

(收稿日期：2025-01-14)

参考文献

- [1] 黄小龙, 赵双伟, 王勇, 等. 环保型高压电力开关设备研究进展综述[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(3): 15-29.
- [2] 李兴文, 朱凯, 郭泽, 等. SF_6 - CF_4 混合气体电弧开断特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3315-3322.
- [3] 赵虎, 张晗, 李兴文, 等. SF_6 - CO_2 和 SF_6 - CF_4 混合气体断路器的喷口压力特性[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1767-1774.
- [4] 吴军辉, 白苏, 杨志勇, 等. SF_6 断路器强电流开断管内电弧温度测量[J]. 高压电器, 2018, 54(2): 7-11.
- [5] 宋宇, 林莘, 徐建源, 等. 高压断路器中 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 混合气体的开断性能[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 971-981.
- [6] 李刚, 肖剑桥, 阎对丰, 等. 气体电弧在不同气体介质中电子数密度的汤逊散射诊断研究[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 163-168.
- [7] 黄若栋, 黄慧红, 傅明利, 等. 新型环保气体在35 kV断路器中灭弧性能的仿真与实验研究[J]. 高压电器, 2021, 57(3): 54-59.
- [8] 周朕蕊, 韩冬, 赵明月, 等. SF_6 替代气体分解特性的研究综述[J]. 电工技术学报, 2020, 35(23): 4998-5014.
- [9] 李静, 郑浩, 曹云东, 等. SF_6/N_2 混合气体微观电弧特性研究[J]. 电气技术, 2017(10): 42-45.
- [10] 曹蕊, 高文, 赵培, 等. 一种用于测量气体断路器断口间电弧参数的实验装置[P]. 中国专利: CN115128451A, 2022-09-30.