

[真空灭弧室]

126 kV固体绝缘真空灭弧室结构设计

文/西安西电开关电气有限公司 杨 哲 史方颖 王洪川 杨 勇 潘巧梅

随着真空灭弧室烧制工艺水平和触头加工水平的提高，真空灭弧室逐渐向高电压、大容量的方向发展。真空灭弧室额定电流提高是行业难题之一，其原因是：在真空环境下热不能进行传导，不能够像气体绝缘断路器那样依靠外壳进行对流换热。通过研究真空灭弧室主要零部件散热的特点，为大电流的126 kV真空灭弧室设计提供参考。

在设计真空灭弧室时，合理设计真空灭弧室触头、真空灭弧室屏蔽、真空灭弧室外壳以及导电杆，使灭弧室在开断能力不受影响的前提下提高灭弧室的散热能力，达到提高灭弧室散热效率、降低温升的目的。各零部件都能影响真空灭弧室散热，下面分别进行阐述、分析。

触头设计

设计126 kV真空灭弧室触头，主要从触头材料、触头结构两方面进行研究。

1. 触头材料

目前真空开关最主要的触头材料是CuCr合金，CuCr合金触头Cr的含量会引起触头性能的一些变化。分别对Cr含量为25%、30%、40%和50%四种触头进行电性能试验。试验选择结构相同的灭弧室，试品灭弧室仅更换触头材料。试验在触头开距为50 mm的工况下进行，试验电压逐渐升高，直至击穿为止。

从试验结果看，所有触头都具备工频耐压230 kV的绝缘水平。从放电击穿区间来看，放电击穿多集中在290~330 kV区间，说明CuCr触头在真空50 mm开距情况下，极限击穿电压在330 kV以下，CuCr(30%)和CuCr(50%)触头大多数击穿在310 kV以上，工频耐压绝缘性能更

好。而CuCr(30%)触头材料的电流开断能力优于CuCr(50%)触头材料，所以选CuCr(30%)作为126 kV真空灭弧室的触头材料。

2. 触头结构

126 kV固体绝缘真空灭弧室选用3/4线圈的触头结构，产生的纵向磁场应使电弧均匀地分布在触头表面，磁场滞后时间小，产生的纵向磁场均匀且磁场强度在电流峰值时最强，有利于开断。触头闭合时，接触电阻较小，能通过较大的额定电流，保证触头温升不超过允许温升，并且线圈具有较大的截面积，回路电阻小。

触头的电阻是影响温升的最主要因素，电阻包括两个触头片、两个线圈和两个导电杆的电阻之和。电阻与触头各设计参数间的指标趋势分析如图1所示，导体电阻与触头开距、线圈高度及线圈宽度间基本呈线性关系且为负相关，而与触头片槽长的线性关系较不明显。最终确定触头开距为50 mm，线圈宽度为100 mm，单匝线圈高度为20 mm，触头片槽长为35 mm。触头在此参数下具有较好的开断性能，电阻值也较低。触头参数见表1。

表1 触头参数 (单位: mm)

开距	触头直径	导电杆直径	线圈高度	触头片槽长
50	100	70	22	35

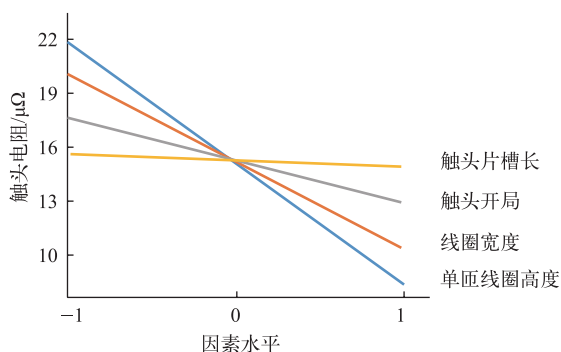


图1 触头电阻与触头设计参数关系

灭弧室屏蔽设计

屏蔽罩主要作用是当触头之间产生电弧时有大量金属蒸汽和液滴向真空灭弧室四周喷溅，如果这些电弧生成物沉积在真空灭弧室的内表面，使真空灭弧室的绝缘强度降低，此外屏蔽罩还有均匀电场，起到均匀触头发热的作用。屏蔽罩的固定方式选择直接影响了真空灭弧室外形尺寸大小，而外表面积大的灭弧室有利于散热。屏蔽罩的主要结构方式有以下几种。

1) 屏蔽罩通过中封环固定在两节瓷壳中间，这种结构及装配工艺成熟简单，如图2所示。因为中间悬浮电位，内部电场分布非常均匀。

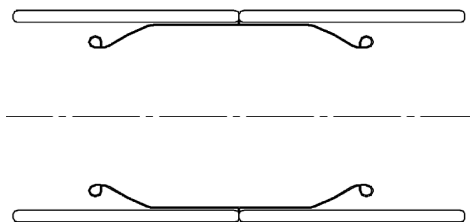


图2 中封环固定屏蔽罩

2) 屏蔽罩外置安装在两节瓷壳中间，有利于电流开断时散发热量，如图3所示。因主屏蔽罩直接外露，灭弧室固封时，屏蔽罩容易受注塑压力而产生向内变形。

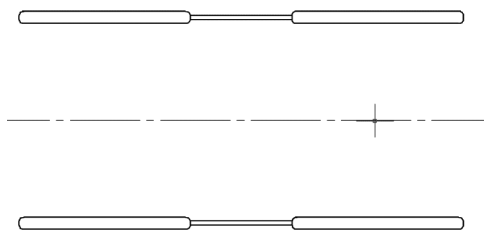


图3 中间外置屏蔽罩

3) 屏蔽罩通过瓷壳内自带的台阶固定，这种结构瓷壳成本相应增加，而且固定工艺应在超净间完成，工序比较繁琐，如图4所示。

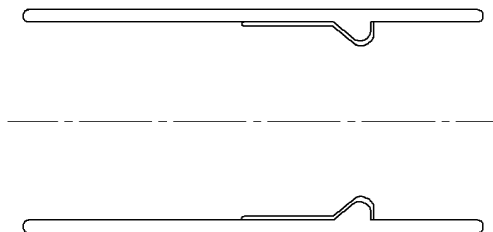


图4 瓷壳台阶固定屏蔽罩

4) 灭弧室由四节瓷壳组成，瓷壳间刚好可采用方式一屏蔽罩固定在两节瓷壳之间，但只采用一个主屏蔽罩所遮挡的灭弧室空间是不够的，需采用主屏蔽罩加两端屏蔽罩的结构。屏蔽罩基本覆盖灭弧室内腔面积较大，当有大电流流过产生热量时，触头和导电杆的热量通过辐射传递到屏蔽罩上，屏蔽罩再将热量均匀地传递到灭弧室外壳上，屏蔽罩能够起到辅助散热的功效，如图5所示。

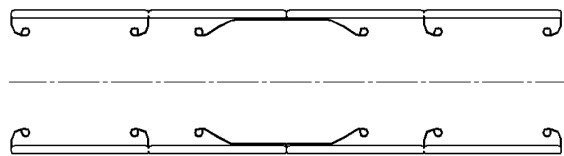


图5 126 kV真空灭弧室四节瓷壳多重屏蔽罩

方式一中屏蔽范围较短，因此不采用。方式二中屏蔽罩作为灭弧室外壳，承受不了固封时的压力，因此不采用。方式三中屏蔽罩加工工艺较为复杂，且屏蔽罩与瓷壳结合面间可能存在隐患，因此不采用。故126 kV真空灭弧室采用方式四多重屏蔽罩。

灭弧室外壳设计

126 kV固体绝缘真空灭弧室采用氧化铝陶瓷外壳，主要有两点考虑：①126 kV真空灭弧室对绝缘要求更高，氧化铝陶瓷外壳除气更彻底；②126 kV真空灭弧室需要进行固封，注塑的冲击力较大，氧化铝外壳抗冲击更好。126 kV固体绝缘真空灭弧室外形尺寸与其他灭弧室追求小型化的原则不同，126 kV真空灭弧室应本着增大灭弧室散热面积的原则，应尽量保证有更大的表面积。但因灭弧室陶

瓷外壳是烧制的，其高度也受烧制炉尺寸的限制。126 kV真空灭弧室长度为700~800 mm之间，直径约200 mm，共有四节瓷壳组成。126 kV真空灭弧室外形尺寸见表2。

表2 126 kV真空灭弧室外形尺寸

灭弧室长度/mm	瓷壳长度/mm	灭弧室直径/mm	灭弧室表面积/m ²
900	800	200	1

导电件的设计

126 kV真空断路器灭弧室动侧导电连接件设计了三种结构：软连接、导电杆及管型母线。从导电截面积、质量及连接方式三方面进行比较。导电件的三种结构见表3。

表3 导电件的三种结构

名称	导电截面积/mm ²	质量/kg	与灭弧室连接方式
软连接	4 000	12.2	压接
管型母线	3 165	4.4	压接
导电杆	1 589	6.1	螺纹连接

三种结构中软连接导电截面积最大，其质量相对管型母线较小。试制软连接进行装配，在固体绝缘套管内软连接装配非常困难，并且在分合闸操作过程中软连接折弯运动轨迹不规律，软连接不规则的运动轨迹会引起局部电场畸变，从而引起放电。

管型母线导电截面积也较大，通流能力较强。试制管型母线实际装配较为简单，但由于直径较大，无法使用导向装置对中管型母线，对中不好可能引起触头开断短路电流失败，还会引起局部应力集中而其他部分虚接的状况，从而引起局部发热。

导电杆的截面积最小，但按照铜棒2~3 A/mm²的电流密度计算， $\phi 45$ 导电杆截面积为1 589 mm²，按照铜棒最小电流密度2 A/mm²计算，其通流能力为3 178 A，也能够满足2 500 A额定电流的通流能力。导电杆直径较小，对中可通过导向套实现。质量较小，能够减小运动质量，有助于提高合闸速度。螺纹连接可点胶或顶丝紧固，相对压接更可靠，不易出现松动，并且螺纹连接，导电杆端面与灭弧室动侧能够完全贴合，导电性能更好，导电杆安装也较为简单。综上，连接灭弧室与出线端子之间采用导电杆较为合适。

结构设计

固封真空灭弧室结构设计主要从以下几个方面进行考虑：①根据真空灭弧室外径确定玻璃钢筒的内径，并且考虑预留硅橡胶粘接的厚度，硅橡胶过少无法保证粘接的牢靠性，硅橡胶过多则制造成本会提高；②根据电场仿真计算结果确定真空灭弧室与玻璃钢筒粘接的相对位置；③根据玻璃钢筒所要承受的冲击力大小确定筒壁厚度；④根据外绝缘要求，确定硅橡胶爬距及玻璃钢筒的长度。kV真空灭弧室固封尺寸见表4。

表4 126 kV真空灭弧室固封尺寸（单位：mm）

玻璃钢筒内径	玻璃钢筒厚度	玻璃钢筒长度	硅橡胶厚度
218	20	1 205	3

确定玻璃钢筒与硅橡胶的外形尺寸后，还要设计真空灭弧室与玻璃钢筒之间的相对位置。真空灭弧室固封位置越靠近出线端子，其通过导电件向出线端子传热路径就越短，越有利于真空灭弧室散热。选取两种灭弧室位置：工况一为静触头端面距离出线端子为695 mm；工况二为静触头端面距离出线端子为602.5 mm（即均分玻璃钢筒）。对两种工况分别建立模型，并进行电场计算。试验电压按照GB/T 11022—2011《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》中规定的126 kV开关设备断口进行，工频耐受电压（230+73）kV，雷电冲击耐受电压（550+103）kV。工况一静触头端面与出线端距离如图6所示，工况二静触头端面与出线端距离如图7所示。

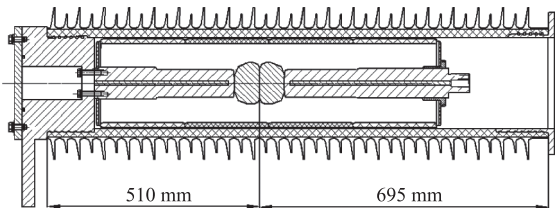


图6 工况一静触头端面与出线端子距离

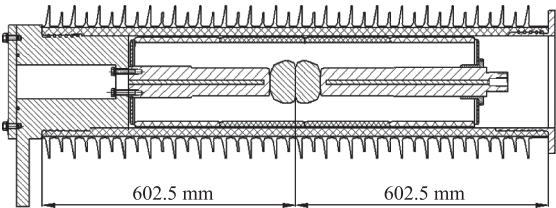


图7 工况二静触头端面与出线端子距离

两种工况下灭弧室电场强度比较见表5。

表5 灭弧室电场强度比较 (单位: kV/mm)

工况	静触头		动触头	中间屏蔽	静屏蔽	动屏蔽
工况一	静侧加工频	8.58	8.61	9.19	9.83	13.56
	动侧加工频	8.64	8.55	9.16	10.6	12.57
	静侧加雷电	8.41	18.59	19.97	10.53	14.99
	动侧加雷电	8.39	18.61	20.02	10.58	14.95
工况二	静侧加工频	9.59	9.85	7.23	9.72	11.26
	动侧加工频	9.72	9.74	7.06	10.25	10.58
	静侧加雷电	0.67	21.24	15.59	21.13	24.34
	动侧加雷电	0.64	21.28	15.63	21.20	24.27

从电场仿真结果看, 工况一电场除中间屏蔽外, 其他各部位电场都优于工况二。中间屏蔽为主屏蔽能够承受较高的电场强度, 从电场计算结果看, 静触头至出线端子距离为695 mm, 电场强度较为理想, 虽然静触头至出线端子距离为602.5 mm时传热路径更短, 但不能采用。由此可见在大电流126 kV真空灭弧室的设计中, 首先要考虑电场强度的设计, 不能牺牲电场的裕度去考虑传热、散热的设计。

真空灭弧室温升仿真验证

按照上述固体绝缘真空灭弧室设计结构进行三维建模, 并进行仿真验证, 如图9所示。真空灭弧室外部的固封胶体、玻璃布棒缠绕筒及硅橡胶等绝缘材料为一种热导率非常低的绝缘材料。对散热翅片与空气之间的对流换热、热辐射可通过表面换热系数做简化处理, 忽略不同位置处散热翅片表面换热系数的差异。126 kV固体绝缘真空灭弧室模型及网格划分如图8所示。

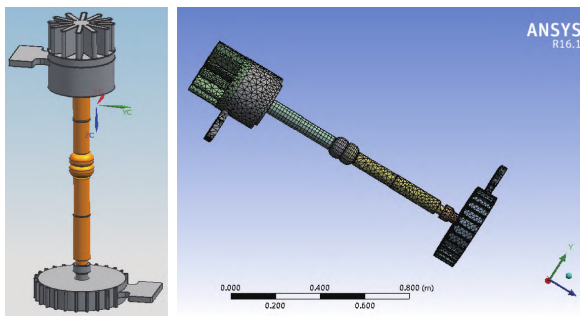


图8 126 kV固体绝缘真空灭弧室模型及网格划分

对126 kV固体绝缘真空灭弧室模型进行网格划分。对接触电阻大的连接面, 会集中生热而产生比较大的温度梯度, 故对这些地方进行局部网格细化。为提高运算速度, 对温度梯度变化不大的部分, 网格可划分得较为稀疏。

126 kV固体绝缘真空灭弧室导电回路各部分材料为: 灭弧室触头部分为铜, 表面镀银; 灭弧室动静导电杆为铜; 散热器为铝; 进线端子为铝; 导电杆为铜; 出线端子为铝。在ANSYS环境下, 对模型各零件材料进行选择, 并对各零件添加电导率。

在环境温度22 ℃、载流2 500 A情形下的长期温升如图9所示。从图10中可以看出, 在灭弧室动侧导电杆出现最高温度83 ℃, 其最大温升为83 ℃-22 ℃=61 ℃ (即61K)。出现在灭弧室内部, 最高温升未超过70 K, 灭弧室温升仿真合格。

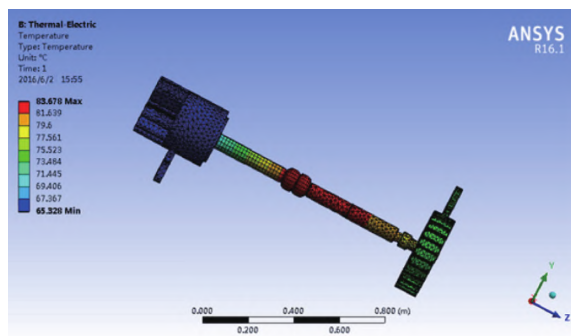


图9 模型通流2 500 A温度场

结束语

126 kV固体绝缘真空灭弧室是目前最环保的126 kV灭弧室结构, 在高压领域完全杜绝了温室气体的使用, 对助力实现“双碳”目标具有重要意义。但真空灭弧室没有热传导, 外部固体绝缘热传导很差, 温升一直是限制其研发、设计的重要因素。本文以固体绝缘真空灭弧室各主要零部件为研究对象, 在满足绝缘性能的前提下, 尽可能地提高零部件散热性能, 从而提高真空灭弧室散热效率。对固体绝缘真空灭弧室的研发、设计具有借鉴意义。EA

(收稿日期: 2021-10-12)