第 49 卷 第 2 期：493-504 高电压技术 Vol.49, No.2: 493-504
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220916

高湿环境下 40.5 kV 开关柜凝露发展特性与加热器布置方法

舒胜文[1]，许俊炜[1]，占兆璇[1]，黄　勇[1]，林一泓[2]，陈　晔[2]
（1. 福州大学电气工程与自动化学院，福州 350108；
2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院，福州 350007）

摘　要：高湿环境引起的凝露问题是导致高压开关柜绝缘故障的主要原因之一。为此，在研究 KYN61−40.5 型高压开关柜凝露发展特性的基础上，提出了一种综合考虑温升大小、温升均匀性、除湿效果和总功耗的加热器布置方法。首先，在人工气候室中开展了高湿环境下开关柜内部凝露发展特性试验；其次，对比研究了不同加热器的有效加热空间和加热均匀性；然后，基于综合评价函数选取最优加热器布置方案并开展了试验验证；最后，结合电磁−流体−温度多物理场数值仿真，探讨了通流对开关柜内部温湿度分布特性的影响和开关柜的受潮凝露机理。结果表明：电缆室电流互感器是易凝露的部位，以支架形式安装的硅橡胶加热器具有最佳的有效加热空间和温升均匀性，最佳加热器布置方法能够在 8 h 内除凝露且不造成绝缘件的过度加热。研究结果可为高压开关柜的凝露机理分析和加热器布置提供参考。

关键词：开关柜；受潮凝露；有效加热空间；加热器布置；多物理场仿真

Condensation Development Characteristics and Heater Arrangement Method of 40.5 kV Switchgear Under High-humidity Environment

SHU Shengwen[1], XU Junwei[1], ZHAN Zhaoxuan[1], HUANG Yong[1], LIN Yihong[2], CHEN Ye[2]
(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Electric Power Research Institute of Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China)

Abstract: Condensation caused by high-humidity environment is one of the main reasons for the insulation failure of high-voltage switchgear. Therefore, based on the study on the condensation development characteristics of KYN61−40.5 high voltage switchgear, a heater arrangement method, in which the temperature rise, temperature rise uniformity, dehumidification effect and total power consumption are comprehensively taken into consideration, is proposed in this paper. First, the test of condensation development characteristics inside the switchgear under humid environment is carried out in an artificial climate chamber. Secondly, the effective heating space and heating uniformity of different heaters are comparatively studied. Then, the optimal scheme for heater arrangement is obtained based on the comprehensive evaluation function and experimentally verified. Finally, combined with the electromagnetic-fluid-temperature multi-physics numerical simulation, the influences of load current on the distributions of temperature and humidity inside the switchgear and the moisture condensation mechanism of the switchgear are discussed. The results show that the current transformers in the cable room are the parts prone to condensation. The silicone rubber heater installed in the form of a bracket has the best effective heating space and temperature rise uniformity. The optimal scheme for heater arrangement can remove condensation within 8 hours without causing overheating of insulating components. The results can provide reference for the condensation mechanism analysis and heater arrangement of high voltage switchgear.

Key words: switchgear; moisture condensation; effective heating space; heater arrangement; multi-physics simulation

0　引言

作为电力转换的重要设备，高压开关柜在高湿度环境中易出现凝露问题。研究表明，当开关柜绝缘件表面出现凝露时，一方面会造成表面电阻率降低[1-2]；另一方面，由于露珠的不规则形状，凝露会引起绝缘件表面电场畸变，导致局部放电，加速绝缘老化甚至引起击穿[3-5]。此外，凝露会引起电气设备导体部位氧化、绝缘材料霉变腐蚀，造成绝缘性

基金资助项目：国家自然科学基金(52207150)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52207150).

能下降[6]。由此引起的开关柜绝缘击穿事故时有发生[7-8]。因此，研究开关柜凝露发展规律并提出有效的除凝露方法，对提高开关柜在高湿环境下的运行可靠性具有重要意义。

开关柜内部的温湿度分布是影响电气设备表面凝露的重要因素[9-12]，故开关柜内部温湿度分布特性一直是国内外学者的研究重点[13-15]。在试验方面，文献[9]研究了相对湿度和温差对开关柜内壁凝露起始时间的影响规律。在仿真方面，大多数研究通过建立 3 维多物理场耦合仿真模型，分析开关柜内部的温度分布特性[16-18]。文献[19]基于有限体积法开展了开关柜内部温度、气流场分布的多物理场仿真，得到了运行工况下各部件的集中发热部位。针对开关柜多物理场仿真中较少考虑湿度分布的情况，文献[20]仿真分析了 40.5 kV 开关柜过流时内部的温湿度分布特性，并提出了加热和通风措施结合的除湿方法。然而，该模型简化较多，温湿度分布特性可能与实际结果存在一定的差异。

目前，开关柜的防凝露技术主要有加热除湿法、轮转除湿法、冷凝除湿法等[21]。其中，最常采用的是加热除湿法。文献[22]通过智能投切装置控制柜内外温差，研究了加热器的除湿性能。文献[23]通过开关柜智能控制装置，实现了根据设定阈值控制加热器的运行状态。文献[24]设计了一种基于实时计算露点温度的加热器自启动装置。此外，文献[25]针对加热器的运行状态监测，提出了一种加热器断线报警的方法。上述研究为开关柜的加热器布置提供了很好的参考。然而，现有加热器布置方法大多依赖于工程经验，可能存在由于加热器布点或功率不合理引起的加热盲区及过度加热问题，造成凝露加重和绝缘件加速老化等后果。

针对现有研究存在的不足，本文以 KYN61–40.5 型高压开关柜为对象，开展了凝露发展特性试验研究，并提出了一种综合考虑温升大小、温升均匀性、除湿效果和总功耗的加热器布置方法。首先，在人工气候室中，开展开关柜凝露发展特性试验和加热器温升特性试验；然后，提出基于平均温升、温升均匀性、湿度变化和方案总功耗综合评价函数的加热器优化布置方法，并开展除凝露验证试验；最后，基于有限体积法建立开关柜的电磁–流体–温度多物理场仿真模型，对比通流状态对开关柜温湿度分布特性的影响，并分析柜内绝缘件的受潮凝露机理。研究成果可为高压开关柜的凝露机理分析及加热器布置提供理论依据。

1 开关柜凝露发展特性试验

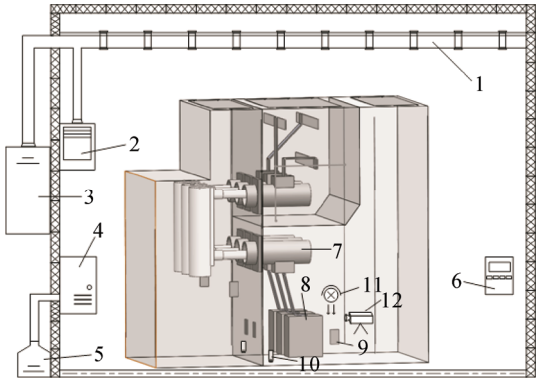
1.1 试验平台

基于人工气候室搭建的试验平台如图 1 所示，主要包括恒温空调、加湿机、除湿机、通风管道等。人工气候室采用温湿度反馈控制，通过传感器与温湿度调节器的配合控制室内环境参数。恒温空调的温度调节范围为 5~40 ℃，精度为[–1 ℃，1 ℃]；加湿机的相对湿度调节范围为 30%~95%，精度范围为[–5%，5%]。恒温空调及加湿机通过通风管道向人工气候室均匀送风，以模拟不同的环境温湿度。以 KYN44A–40.5 型开关柜为对象，通过微型摄像仪观测绝缘件表面凝露生长情况，通过传感器将柜内温湿度数据传至温湿度记录仪。

1.2 试验设置

由于开关柜内电气设备对称分布，实际运行中 A、C 两相靠近柜壁，受外界温湿度影响大，易形成凝露，故本试验选取 A 相绝缘件作为观测对象，探究开关柜电缆室、母线室、断路器室电气设备表面的凝露发展先后顺序。试验采用微型摄像仪观察露珠生长情况，微型摄像仪固定在距离观测位置 8 cm 处，辅以照明灯记录凝露情况。

试验开始前使用保温锡纸对开关柜进行密封处理。试验时，通过调整人工气候室温湿度，使环境达到常温高湿(温度 25 ℃，相对湿度≥90%)条件后开始计时，每隔 30 min 记录一次凝露生长情况。试验过程中，人工气候室长期工作运行，以保持开关柜内温湿度均匀分布。



1—通风管道；2—加湿机；3—恒温空调；4—除湿机；
5—废水容器；6—温湿度记录仪；7—静触头盒；
8—电流互感器；9—硅橡胶加热器；10—温湿度传感器；
11—照明灯；12—微型摄像仪

图 1 人工气候室示意图

Fig.1 Schematic diagram of artificial climate chamber

1.3 试验结果与分析

试验得到的常温高湿环境下电流互感器表面凝露发展过程如图 2 所示。可见电流互感器表面首先出现明显的白雾状小露珠，随着小露珠的不断出现以及露珠间的相互融合，逐渐形成明显可见的露珠。在常温高湿环境下，开关柜内部电气设备的凝露自下而上发展，露珠直径不断增大。

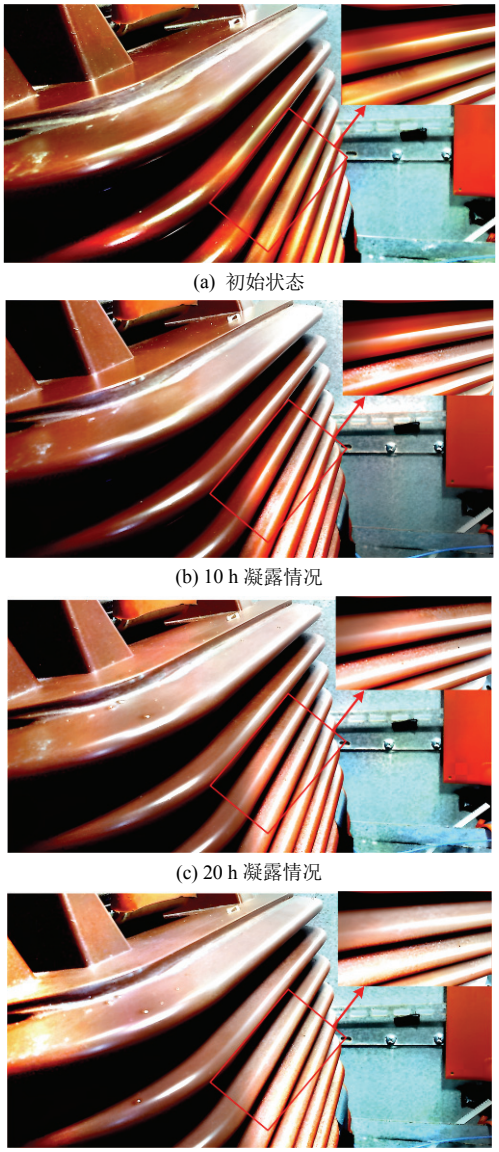
通过整理凝露发展图像，得到常温高湿环境下开关柜各室目标观测位置的白雾状小露珠和可见露珠形成时间，结果如表 1 所示。从表 1 可知，凝露形成的先后顺序依次为：电缆室电流互感器、电缆室静触头盒、母线室静触头盒、断路器室静触头盒。由此表明，高湿环境下潮湿空气首先在开关柜底部聚集，并逐渐自下而上蔓延，直至影响开关柜各隔室。相同环境条件下，柜内电气设备距地面越近，受凝露影响的可能性越大。由于电缆室距地最近且与电缆沟相通，其电气设备表面最易形成凝露，是防凝露的重点区域。母线室与断路器室的电气设备离地相对较远，且隔室密封性良好，因此两室的电气设备表面凝露形成所需时间更长，凝露严重程度相对更小。

2 加热器温升特性试验

2.1 试验设置

DJR–G 型硅橡胶加热器和 DJR–S 型铝合金加热器是目前市面常见的 2 种开关柜加热器，额定电压均为 220 V，安装方式分为支架和贴板 2 种，额定功率分为 50、100 和 150 W 这 3 种。由于加热器在各电压等级开关柜内的温升特性不同，加热效果差别较大，本试验通过在加热器所处空间设置一定数量的测温点，记录测温点温升数据，量化不同型号及安装方式加热器在 40.5 kV 开关柜内的加热性能。

通过预实验可知加热器对上部空间的加热效果更好。结合开关柜电缆室的内部结构布置测温点，并使用 BCL–X 型 32 路测温仪记录各测温点和环境的温度。如图 3 所示，选取开关柜内侧壁为试验位置，以加热器为中心建立空间直角坐标系。由于测温点有限且加热器的加热空间轴对称，故对四分之一加热空间进行测量。具体测温点分布为：*Z* 轴 8 个，*X* 轴 3 个，*Y* 轴 3 个，*XZ*、*YZ* 平面各 5 个，*XY* 平面 2 个，空间中 5 个，室内环境 1 个，总计 32 个测温热电偶。加热器温升特性试验共计 12 组，加热总时长 180 min，每隔 15 min 记录一次测温点温升数据。



(a) 初始状态

(b) 10 h 凝露情况

(c) 20 h 凝露情况

(d) 30 h 凝露情况

图 2 电缆室电流互感器表面凝露发展过程

Fig.2 Development process of condensation on the current transformer surface in cable room

表 1 开关柜凝露发展特性试验结果

Table 1 Test results of condensation development characteristics of switchgear

观测位置	白雾状小露珠形成时间/h	可见露珠形成时间/h
电缆室电流互感器	1.5	4.0
电缆室静触头盒	3.0	8.0
母线室静触头盒	16.0	20.5
断路器室静触头盒	18.0	25.0

试验在 1.1 节的人工气候室中完成，试验过程中，保持气候室环境温度 20 ℃和相对温度 65%不变。每组试验结束后，启动通风系统 120 min，以降低加热余温对试验的影响。

2.2 试验结果与分析

通过整理测温点温升数据，选取加热时间内温升>2 ℃的测温点，构建立体菱形和立体圆锥形这 2 种三维模型，并将其体积定义为加热器的有效加热空间，如图 4 所示。可见由于热空气的密度小，存在一定的上升热气流，加热器对其上方空间的加热效果优于下方空间的效果。

加热器有效加热空间的影响范围及 2 种加热空间体积计算结果如表 2 所示。由于加热器安装方式对有效加热空间体积的影响小，有效加热空间体积的计算不考虑该因素。可见不同类型加热器采用立体菱形或者立体锥形计算得到的有效加热空间大小

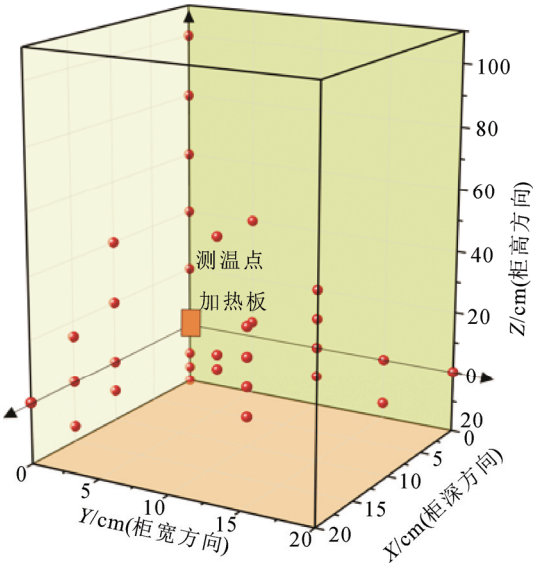


图 3 测试点布置示意图

Fig.3 Schematic diagram of test point arrangement

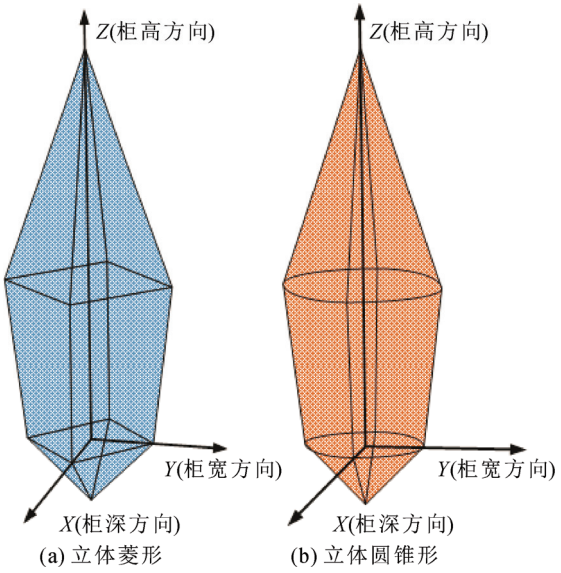


图 4 100 W 加热器的有效加热空间

Fig.4 Effective heating space with 100 W heater

比值几乎相同，表明有效加热空间的相对大小与三维模型描述方法关系不大。由于测温点数量有限，将选取出的有效加热空间坐标进行线性拟合构建立体菱形三维空间模型是更常用的方法，故本文采用立体菱形描述有效加热空间的相对大小。

分析表 2 可知，相同功率下硅橡胶加热器的 X、Y 轴影响范围和有效加热空间体积总是优于铝合金加热器。其中，150 W 硅橡胶加热器的加热效果最优。此外，如果加热器类型、功率和数量搭配合理，则总功率较小的方案可能比总功率较大的方案具有更好的加热效果。

为更全面描述加热器的加热性能，引入平均加热系数 K，计算加热器的温升均匀性。K 值越小，表明加热器的加热均匀性越好。K 的计算式为

$$K = \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\text{ave}}} \tag{1}$$

式中：$\Delta T_{\max}$ 为每组试验测温点的温升最大值；ΔT_{ave} 为每组试验测温点的温升平均值。

通过式(1)计算得到的不同型号加热器的平均加热系数结果如表 3 所示。可以看出，以支架形式

表 2 加热器有效加热空间特性数据

Table 2 Data on the effective heating space characteristics of heaters

型号	X、Y 轴范围/m	Z(负)轴范围/m	有效加热空间体积/m³		比值
			立体菱形	立体锥形	
150 W 铝合金	0.2	0.2	0.083 8	0.052 9	1.584
150 W 硅橡胶	0.25	0.25	0.134 2	0.085 4	1.571
100 W 铝合金	0.15	0.2	0.056 5	0.035 6	1.587
100 W 硅橡胶	0.2	0.2	0.068 6	0.043 7	1.570
50 W 铝合金	0.1	0.15	0.026 6	0.012 3	1.570
50 W 硅橡胶	0.15	0.15	0.056 0	0.035 3	1.586

表 3 不同型号加热器的平均加热系数

Table 3 Average heating coefficients of different types of heaters

功率/W	型号	安装方式	平均加热系数
50	铝合金	支架	6.532
	铝合金	贴板	4.492
	硅橡胶	支架	3.976
	硅橡胶	贴板	4.107
100	铝合金	支架	6.534
	铝合金	贴板	5.334
	硅橡胶	支架	3.601
	硅橡胶	贴板	5.012
150	铝合金	支架	7.915
	铝合金	贴板	5.704
	硅橡胶	支架	4.542
	硅橡胶	贴板	4.656

安装的硅橡胶加热器加热均匀性在各功率下总是最优。以支架形式安装的铝合金加热器加热均匀性最差，长时间使用该种加热器容易引起局部温升过高、绝缘老化加剧等问题。此外，随着功率的增加，加热器的温升均匀性有所下降。

总体来说，硅橡胶加热器的有效加热空间和温升均匀性均优于铝合金加热器，且硅橡胶加热器以支架形式安装时的温升均匀性最佳，加热效果最好。

3 加热器布置方法与试验验证

3.1 加热器布置方案的评价函数

为更好评价各种加热器布置方案的加热除凝露性能，综合考虑加热器的除湿性能、经济性以及加热盲区和过度加热引起的绝缘老化问题，提出基于平均温升 X_1、温升均匀性 X_2、湿度变化 X_3 和方案总功耗 X_4 加权平均的评价函数 F，表达式为

$$F=\sum_{i=1}^{4}\omega_i X_i \tag{2}$$

式中，$\omega_i(i=1,2,3,4)$为根据工程经验设定的权重系数；$X_i(i=1,2,3,4)$为经归一化处理后各变量的值，其中 X_3 取湿度变化值的倒数。评价函数 F 的值越小，加热器布置方案的性能越好，即在取得良好除湿效果的同时获得较为均匀的温升效果，避免存在加热盲区及对绝缘件的过度加热，同时加热器功耗最小，成本最低。

在实际工程应用中，平均温升值、温升均匀性、湿度变化、方案总功率的权重系数$\omega_i(i=1,2,3,4)$可依据不同的需求选取。本文初步给出 2 种权重系数选取方案，如表 4 所示。

3.2 基于综合评价函数的加热器优化配置试验

试验前在柜内绝缘件表面布置热电偶测温点和湿度传感器，测温点用保温锡纸覆盖后固定。以电流互感器和触头盒为测温重点区域，以电气设备三相间隔处为测湿重点区域，布置如图 5 所示的测量点。

通过预试验得到柜内温升在 250 min 左右达到稳定，故试验时间为 300 min，每隔 30 min 记录一次数据。试验过程中，保持柜外环境温度为 30 ℃，相对湿度为 75%左右。每组加热器优化配置试验结束后通风 120 min，以降低绝缘件表面余温的影响。

根据工程应用经验，为避免过度加热可能出现的绝缘老化问题，限制加热器数量上限为 4 个，单个功率上限为 100 W。通过多组试验确定了不同数量加热器的相对最优位置，如图 6 所示。其中，2 个加热器方案由于需要兼顾电流互感器和静触头盒的除湿效果，在电缆室中下隔板布置最佳；3 个加热器方案的位置受到加热器布置对称性的限制，仅考虑了常规布置方式；4 个加热器方案是在 2 个加热器最优方案的基础上增加 2 个侧壁加热器。

不同加热器布置方案的加热除湿性能参数试验结果如表 5 所示。表 5 中，平均温升值取电缆室静触头盒及电流互感器的平均温升，温升均匀性在

表 4 综合评价函数权重系数选取方案

Table 4 Comprehensive evaluation function weight coefficient selection scheme

方案	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
1	0.25	0.25	0.25	0.25
2−1	0.2	0.2	0.4	0.2
2−2	0.167	0.167	0.5	0.167
2−3	0.133	0.133	0.6	0.133

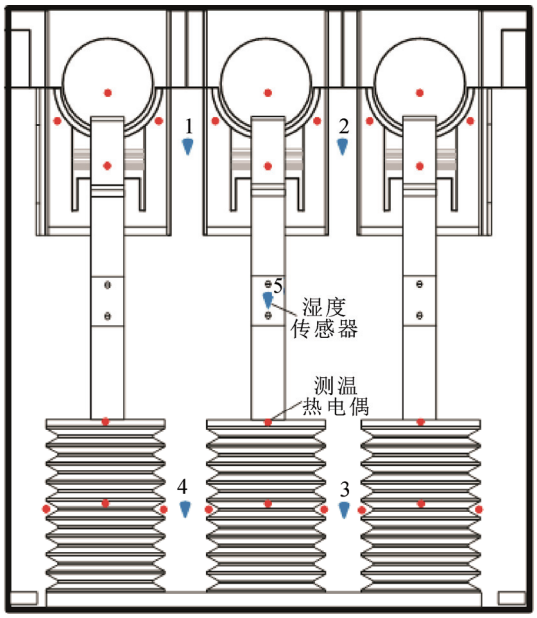
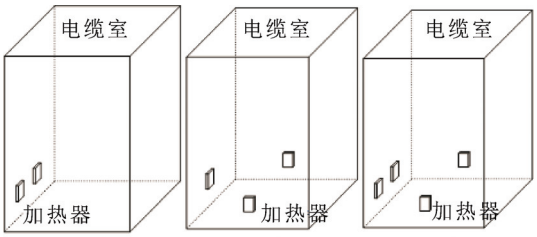


图 5 电缆室测温热电偶与湿度传感器分布

Fig.5 Distribution of temperature measuring thermocouple and humidity sensor in cable room



(a) 2个 (b) 3个 (c) 4个

图 6 3 种加热器方案的最优布置位置

Fig.6 Optimal placement of the three heater schemes

平均温升的基础上通过计算平均加热系数 K 得到，湿度变化取试验时间内的相对湿度变化值，方案总功耗为加热器方案的功率总和。分析表 5 可知，当加热器数量较少或功率较小时，平均温升值较小，除湿能力弱；随着加热器数量和功率的增大，平均温升值和除湿能力会随之增大，温升均匀性明显改善。

基于表 5 的试验数据可计算得到不同加热器布置方案的评价函数 F，结果如表 6 所示。从表 6 可知，加热器的最优方案与实际需求密切相关。当考虑 4 个性能指标同等重要时，4 个 50 W 的方案最优；着重考虑除湿能力时，依据除湿能力的重要程度又有不同的最优方案。为保证开关柜具有良好的除湿性能，本文着重考虑了加热器方案的除湿性能，采用方案 2−3 开展研究，选取出的最优加热器方案为 4 个 100 W，性能排名前四的方案依次为 4 个 100 W、4 个 75 W、3 个 100 W、3 个 75 W。

表 5 不同加热器布置方案的加热除湿参数

Table 5 Heating and dehumidification parameters of different heater arrangements

功率/W	加热器数量	总功率/W	平均温升值/℃	相对湿度差值/%	温升均匀性
50	2	100	0.88	5.25	3.94
	3	150	1.31	3.43	3.38
	4	200	1.93	6.78	2.08
75	2	150	2.00	6.14	2.42
	3	225	1.72	9.48	2.88
	4	300	2.65	11.46	2.09
100	2	200	2.14	9.32	2.75
	3	300	2.73	12.48	2.41
	4	400	3.77	18.56	1.84

表 6 评价函数的计算结果

Table 6 Calculation results of evaluation function

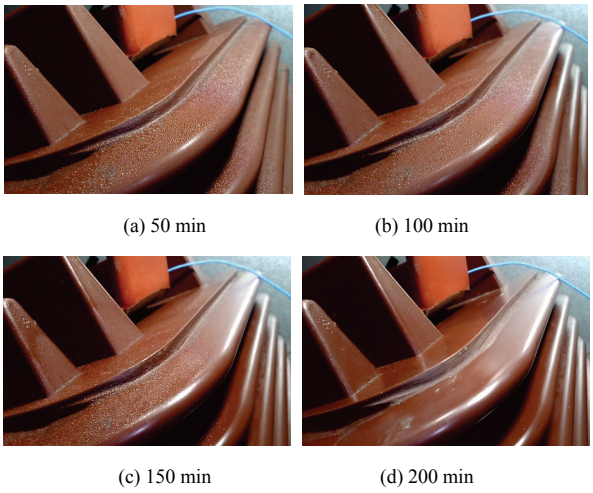
功率/W	加热器数量	评价函数 F 值			
		方案 1	方案 2−1	方案 2−2	方案 2−3
50	2	0.394	0.430	0.454	0.478
	3	0.512	0.610	0.675	0.740
	4	0.301	0.320	0.332	0.344
75	2	0.322	0.350	0.368	0.386
	3	0.355	0.327	0.309	0.290
	4	0.385	0.336	0.304	0.270
100	2	0.357	0.330	0.313	0.295
	3	0.422	0.360	0.319	0.276
	4	0.500	0.400	0.334	0.266

3.3 加热器最优配置方案的除凝露的试验验证

为验证上述得到的加热器最优配置方案的除凝露性能，在人工气候室中，开展了高湿环境下的除凝露验证试验。试验开始前，设定人工气候室初始相对湿度为 90%，并采用安装于电缆室与电缆沟连接处的小型加湿器对柜内进行加湿，时间为 90 min。加湿结束后关闭小型加湿器，启动加热器以及测温测湿设备。通过微型摄像仪观测绝缘件表面的凝露变化情况，每隔 10 min 记录一次柜内相对湿度并进行照片存储，直至柜内所有绝缘件表面完全除凝露。

以 4 个 100 W 加热器方案为例，柜内电流互感器除凝露过程如图 7 所示。可以较为直观地发现：随着加热时间的增加，观测位置的露珠数量减少、单个露珠体积变小。当加热时间为 200 min 时，观测位置完全除凝露；当加热时间为 480 min 时，电缆室电气设备表面完全除凝露。

4 种加热器方案的除凝露验证结果如表 7 所示。可以看到，4 种加热器方案均能在一定时间内实现



(a) 50 min (b) 100 min

(c) 150 min (d) 200 min

图 7 电缆室 A 相电流互感器表面的除凝露过程

Fig.7 Process of removing condensation on the current transformer surface of phase A in the cable room

表 7 除凝露验证试验数据

Table 7 Data of the verification test for dew condensation

加热器方案	相对湿度差值/%				完全除凝露时间/h
	电缆室电流互感器	电缆室触头盒	断路器室触头盒	母线室触头盒	
3 个 75 W	17.4	19.1	11.4	14.5	13.0
4 个 75 W	18.4	21.9	14.3	16.4	11.0
3 个 100 W	24.2	31.4	15.8	19.4	9.0
4 个 100 W	26.1	32.2	20.3	21.4	8.0

高湿环境下绝缘件表面的完全除凝露。同时可以发现，加热器方案中单个加热器功率越大，除湿效果越好(相对湿度差值越大)，完全除凝露时间越短。其中，4 个 100 W 加热器方案可在 8 h 内完全除凝露。此外，加热器方案总功率大小是影响除湿能力的重要因素，即除湿能力与总功率大小正相关。

4 讨论与分析

为了分析高湿环境下开关柜凝露和加热器除凝露机理，本文建立了基于有限体积法的开关柜内部电磁–流体–温度多物理场仿真模型。首先，通过对比不同最优加热器配置方案下温湿度的试验值与仿真值，验证多物理场仿真模型的准确性；然后，分析通流对开关柜内部温湿度分布特性的影响；最后，探究开关柜内不同隔室及绝缘件表面的受潮凝露机理。

4.1 多物理仿真模型的准确性验证

在加热器优化配置试验中，环境温度为 30 ℃，相对湿度为 75%，以此作为多物理仿真中的温度和湿度初始条件，仿真时长设定为 300 min，步长为 1 min。仿真中，温湿度测量点的设置与试验一致。以 4 个 100 W 加热器方案为例，电缆室 A 相静触头盒及电流互感器温升仿真与试验数据的对比如表 8 所示。可以发现，电流互感器温升的仿真与试验数据一致性一般，静触头盒温升的仿真与试验数据一致性较好。分析其主要原因可能是试验过程中，电流互感器与加热器几乎处于同一水平面，静触头盒位于加热器上方，由于热空气向上流动，故静触头盒周围的空气流动比电流互感器周围的空气流动更加均匀，从而获得了更均匀的温升效果。此外，仿真中的空气流动相对理想，整体温升较为均匀。

同样以 4 个 100 W 加热器方案为例，各相对湿度测量点的相对湿度数据对比如图 8 所示。图 8 中，相对误差特指相对湿度差值(初始相对湿度与终止相对湿度之差)仿真与试验值的相对误差。可以看到，仿真与试验的相对湿度数据有较好的一致性，相对湿度差值的平均绝对百分比误差仅为 6.02%。其中，测量点 2 相对湿度差值的仿真与试验值完全一致。

为进一步对比仿真与试验结果的一致性，仿真计算了加热器优化配置试验中得到的 4 组加热器方案的温升与除湿效果，结果如表 9 所示。表 9 中，温升与相对湿度数据均为所有测量点的平均值。可以看出，平均温升和相对湿度差值的仿真与试验数据均具有良好的一致性，平均绝对百分比误差分别为 5.61%和 5.83%。

表 8 电缆室仿真与试验温升数据对比

Table 8 Comparison of temperature rise data between simulation and experiment of cable room

位置	测温点	试验温升/℃	仿真温升/℃
A 相电流互感器	T_1	1.355	3.500
	T_2	4.425	3.252
	T_3	2.96	3.588
	T_4	6.30	3.664
	T_5	2.495	3.288
A 相静触头盒	T_{17}	4.785	4.975
	T_{18}	3.565	3.558
	T_{19}	3.585	3.579
	T_{20}	3.835	2.759
A 相平均温升		3.701	3.574

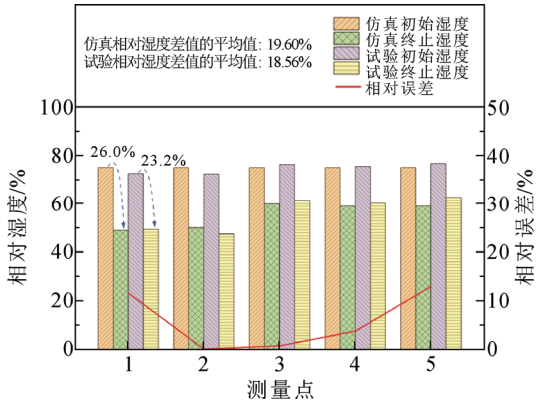


图 8 试验与仿真相对湿度数据对比

Fig.8 Comparison of experimental and simulated relative humidity data

表 9 仿真与试验温湿度数据对比

Table 9 Comparison of temperature and humidity data between simulation and experiment

加热器方案	仿真温升/℃	试验温升/℃	温升相对误差/%	仿真相对湿度差值/%	试验相对湿度差值/%	相对湿度差值的相对误差/%
4 个 100 W	3.63	3.77	−3.71	19.60	18.56	5.60
4 个 75 W	2.80	2.65	5.66	12.20	11.46	6.46
3 个 100 W	2.50	2.73	−8.42	13.20	12.48	5.77
3 个 75 W	1.64	1.72	−4.65	10.00	9.48	5.49

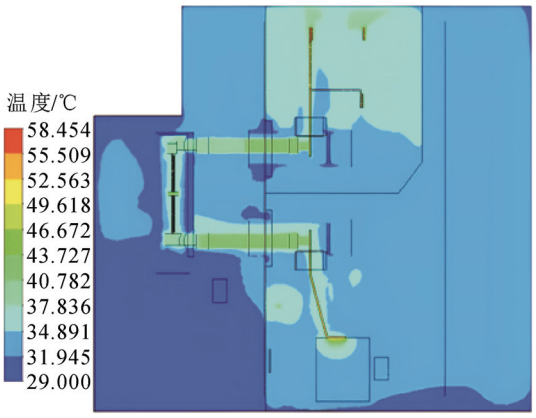
4.2 通流对开关柜温湿度分布特性的影响

在开关柜内部，通电导体会有不同程度的温升，从而驱动空气流动，改变柜内温湿度分布特性。

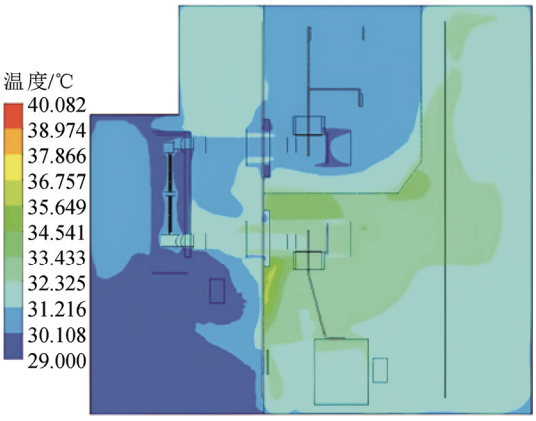
因此，本文以 4 个 100 W 加热器方案为例，研究通流对开关柜内部温湿度分布的影响。开关柜通以 1250 A 的额定电流，其余仿真参数设置同 4.1 节。

通流与未通流状态的开关柜内部温度分布如图 9 所示。从图 9 可以看出，通流与否对开关柜内部不同区域的影响各不相同。通流状态下母线室的温度上升明显，而电缆室和断路器室内部温度上升较小。

为进一步对比通流状态对各部位凝露状态的影响，测量了各隔室及主要绝缘件表面的温度，结果如表 10 所示。可以看到，相比于未通流状态，通流状态下的母线室整体温升超过了 4 ℃，其中母排上的温升达到了 21.676 ℃，故母线室中触头盒及母排的凝露形成难度增大。由于动静触头盒接合时厚度较大，具有一定的保温效果，断路器室空间区域温度分布改变很小，温升仅有 1.497 ℃。电缆室中的主要绝缘件电流互感器及静触头盒均仅有 1 ℃左右的温升，隔室内整体温度分布几乎不变。



(a) 通流状态



(b) 未通流状态

图 9 不同状态下开关柜中截面温度分布云图

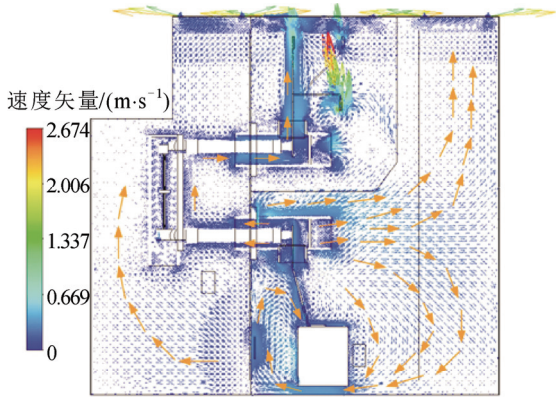
Fig.9 Cloud diagram of temperature distribution in the middle section of switchgear under different states

不同状态下的开关柜内空气流场分布如图 10 所示。可以看出，相比于未通流状态，由于通流导致导电结构发热，绝缘件周围流场运动更为剧烈。然而，通流与未通流状态下流场与外部环境的空气交换程度接近，通流状态对气流向外运动的影响很有限。

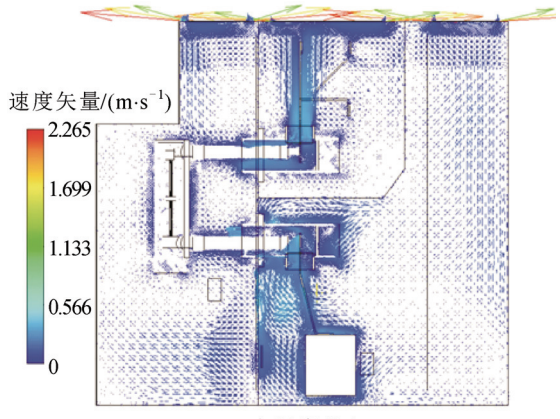
表 10 不同状态时开关柜各部位的温度分布

Table 10 Temperature distribution of each part of the switchgear in different states

隔室	部位	温度值/℃		差值/℃
		通流	未通流	
母线室	空间	34.930	30.422	4.508
	母排	52.335	30.659	21.676
	触头盒	32.764	29.422	3.342
电缆室	空间	34.765	32.977	1.788
	触头盒	33.606	32.663	0.943
	电流互感器	33.309	32.266	1.043
断路器室	空间	32.441	30.944	1.497
	触头盒	29.891	29.422	0.469



(a) 通流状态



(b) 未通流状态

图 10 不同状态下开关柜中截面流场分布

Fig.10 Distribution of cross-section flow field in switchgear under different states

通流与未通流状态下柜内各测量点的相对湿度对比如图 11 所示。分析可知，通流状态下的除湿效果优于未通流状态，主要是由于通流状态下各导电结构有不同程度的温升，引起了相对湿度一定程度的下降。然而，通流状态与未通流状态的相对湿度变化最大差值为 6%，平均差值为 3.92%，说明通流对除湿效果的影响十分有限。

总体而言，当开关柜通以额定电流时，与未通流状态相比，通流状态下绝缘件有 1 ℃左右的温升、4%左右的相对湿度下降。然而，40.5 kV 开关柜大部分时间的实际负荷电流只有额定电流的 50%左右，因导电结构通流发热引起的柜内温湿度分布改变更小。因此，通流对开关柜内部温湿度分布特性的影响较小。

4.3 高湿状态下开关柜受潮机理分析

4.3.1 开关柜各隔室凝露发展机理分析

由于不同隔室之间采用金属板分隔，母线室、断路器室和电缆室均设有泄压孔，KYN61−40.5 型开关柜各隔室之间以及柜内外环境存在空气交换，潮湿空气在满足一定的环境条件时将形成凝露。为揭示开关柜内各隔室的凝露发展机理，设置柜外环境温度为 35 ℃，相对湿度为 90%，柜内各隔室初始温度为 25 ℃，初始相对湿度为 25%；仿真时间设为 300 min，自适应步长；开关柜通过工频额定电流，即 1250 A。不同时刻各隔室中切面空气的水蒸汽质量分数分布如图 12 所示。

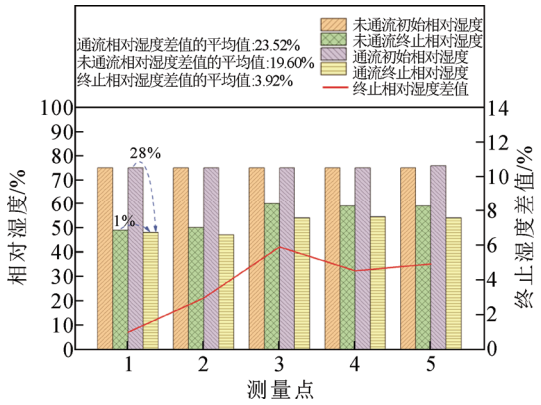


图 11 通流与未通流状态的相对湿度数据对比

Fig.11 Comparison of relative humidity data between current and non-current states

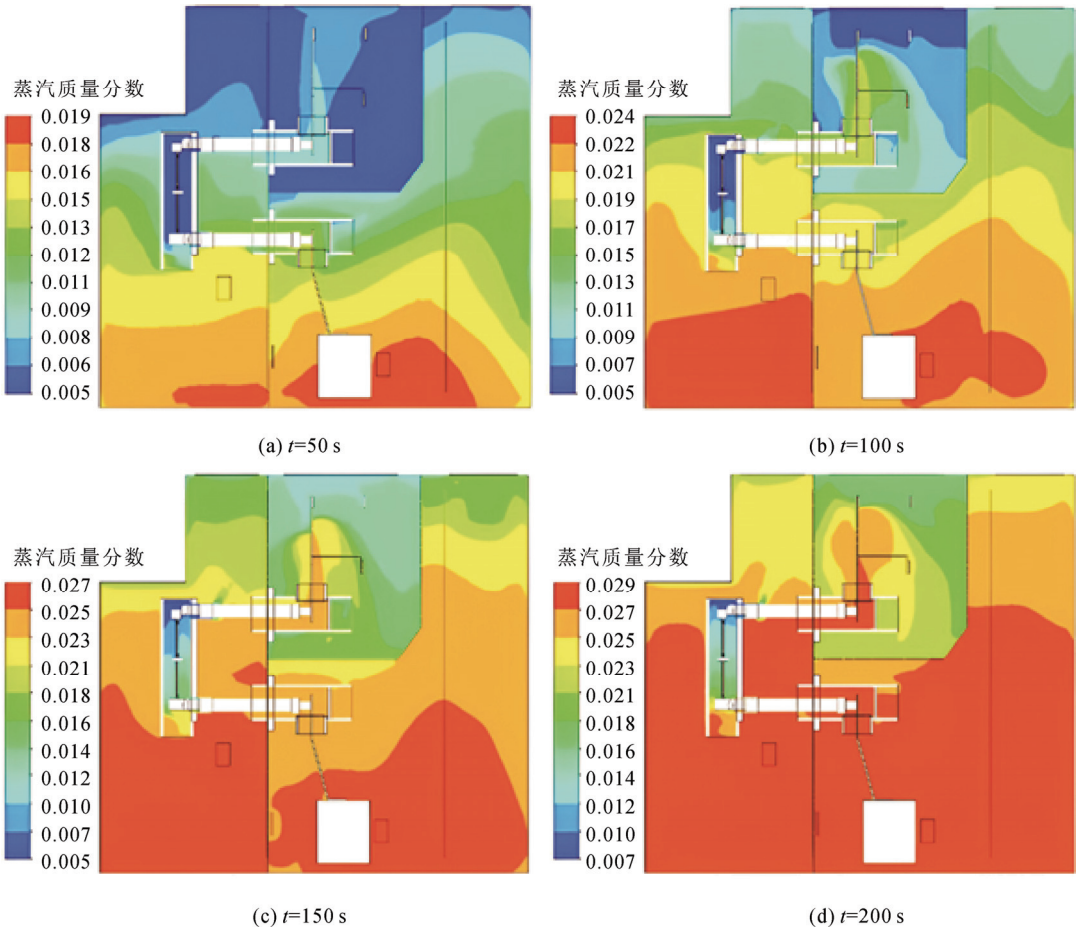


图 12 中切面空气的水蒸气质量分数分布云图

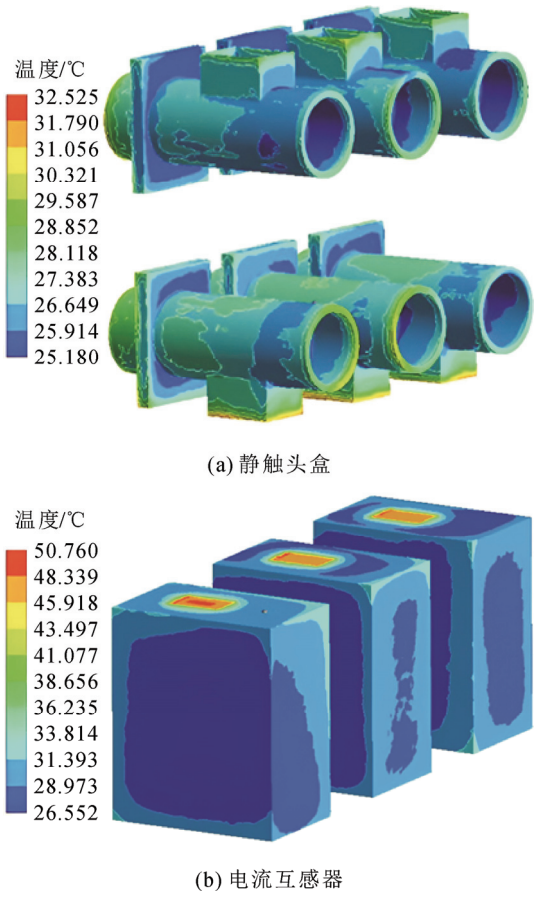
Fig.12 Cloud map of water vapor mass fraction distribution of air in mid-section

分析图 12 可知，潮湿的空气最早聚集在电缆室和断路器室的底部，尤以电流互感器周围区域最严重，并随时间的推移不断积累并逐渐向上发展。由于绝缘件放置位置低，电缆室受潮湿空气的影响最大；母线室受潮湿空气的影响较小，主要是由于母线室位于较高位置，潮湿空气难以直接进入隔室，且母线室自身通流状态下的发热量能够驱散一部分湿空气。

4.3.2 电缆室绝缘件受潮机理分析

电缆室静触头盒和电流互感器表面温度分布的仿真结果如图 13 所示。可以看出，触头盒表面的温度分布不均匀，存在对流缓区，特别是静触头盒凹陷部分的表面温度较低且空气不易流动，湿空气常汇聚于此，造成表面凝露。此外，电流互感器表面大部分区域的温度低，三相之间的区域由于空气流动弱，是易形成凝露的主要区域。

电缆室的电流互感器由于布置位置低，自身结构不利于空气流通且直接与电缆沟相通，是开关柜内易发生凝露的绝缘件。为探究电流互感器在不同湿度情况下的凝露速率，将环境相对湿度 H 设置为 90%、80%、70%，其余设置同 4.3.1 节。在电流互感器表面取一个标记点，测量标记点相对湿度随时间的变化趋势，结果如图 14 所示。从图 14 中可以看出，随着环境相对湿度的增大，标记点的凝露形成时间逐渐缩短。其中，环境相对湿度为 90%时电流互感器表面相对湿度迅速上升，在运行时间为 70 s 时达到凝露条件(相对湿度达到 100%)，环境相对湿度为 80%时的凝露形成时间为 90 s，而环境相对湿度为 70 %时 100 s 内无法形成凝露。因此，在高湿环境下，有必要在高压开关柜电缆室中安装辅助除湿装置。



(a) 静触头盒

(b) 电流互感器

图 13 绝缘件表面温度分布云图

Fig.13 Cloud map of temperature distribution on the surface of insulating components

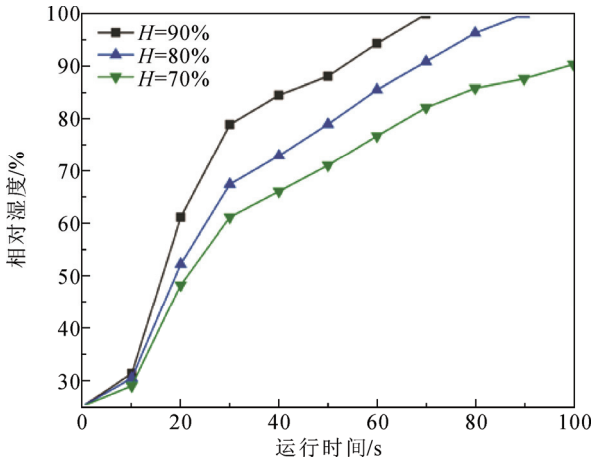


图 14 不同湿度情况时标记点相对湿度的变化趋势

Fig.14 Variation trend of relative humidity of marked points under different humidity conditions

5 结论

1）开关柜内绝缘件凝露形成的先后顺序依次为：电缆室电流互感器、电缆室静触头盒、母线室静触头盒、断路器室静触头盒。由此表明，电缆室电流互感器是易受凝露的部位，应重点关注。

2）硅橡胶加热器的有效加热空间和温升均匀性均优于铝合金加热器，且硅橡胶加热器以支架形式安装时的温升均匀性最佳，加热效果最好。

3）基于综合评价函数得到的 40.5 kV 开关柜除凝露加热器优化配置方案可在 90%的高湿环境中实现 8 h 内完全除凝露，且具有较为均匀的温升效果，避免了加热盲区及对绝缘件的过度加热。

4）与未通流状态相比，通以额定电流状态下开关柜内电缆室绝缘件温升约高 1 ℃，相对湿度下

降约 4%；由于开关柜大部分时间的实际负荷电流只有额定电流的 50%左右，故通流对开关柜内部绝缘件温湿度分布特性的影响有限。

参考文献 References

[1] 黎 鹏，刘 畅，吴泳聪，等. 基于 NSGA-Ⅱ算法的高压开关柜泄压通道优化设计[J]. 高电压技术，2020，46(6)：2013-2020.
LI Peng, LIU Chang, WU Yongcong, et al. Optimization design of pressure relief channel for HV switchgear based on NSGA-Ⅱ[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2013-2020.

[2] 刘轩东，胡钰骁，李亚伟，等. 凝露状态对硅橡胶绝缘表面闪络特性影响的实验研究[J]. 电网技术，2019，43(8)：3047-3054.
LIU Xuandong, HU Yuxiao, LI Yawei, et al. Experimental research of influence of condensation on flashover characteristics of silicone rubber surface[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 3047-3054.

[3] 刘 阳，崔 翔，卢铁兵，等. 湿度对绞线正极性电晕电流脉冲及其无线电干扰影响的实验[J]. 电工技术学报，2015，30(3)：79-89.
LIU Yang, CUI Xiang, LU Tiebing, et al. Experimental investigation of humidity impact on positive corona current pulse and its radio interference of stranded conductors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 79-89.

[4] LOPES I J S, JAYARAM S H, CHERNEY E A. A study of partial discharges from water droplets on a silicone rubber insulating surface[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(2): 262-268.

[5] 刘有为，郑健超. 湿度对绝缘表面工频闪络电压的影响[J]. 中国电机工程学报，1999，19(5)：53-58.
LIU Youwei, ZHENG Jianchao. Influence of humidity on power flashover voltage along insulating surfaces[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 53-58.

[6] 王有元，李伯男，黄磊峰，等. 倒置式油浸电流互感器受潮过程微水含量动态推演方法[J]. 高电压技术，2021，47(6)：1921-1930.
WANG Youyuan, LI Bonan, HUANG Leifeng, et al. Dynamic deduction method of moisture content of inverted oil immersed current transformer during damp process[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1921-1930.

[7] TOYODA E, MATSUMOTO M, HANDA T, et al. Insulation failure in telecommunication cables resulting from water condensation in aerial terminal closures and its prevention using a humidity-controlling polymer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(1): 175-182.

[8] 朱根良. 浅议中压开关柜事故调查中的故障分析[J]. 高压电器，2002，38(5)：62-63.
ZHU Genliang. Simple explanation of faults analysis in incident investigation of medium voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(5): 62-63.

[9] 刘若溪，白宝军，郭 沁，等. 开关柜凝露现象机理分析研究[J]. 高压电器，2018，54(10)：80-84.
LIU Ruoxi, BAI Baojun, GUO Qin, et al. Analysis on condensation phenomenon mechanism of switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 80-84.

[10] 刘云鹏，郭 沁. 高压开关柜电缆室温湿度场数值计算分析[J]. 高压电器，2017，53(9)：6-10，16.
LIU Yunpeng, GUO Qin. Numerical calculation of temperature and humidity fields in cable room of high-voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(9): 6-10, 16.

[11] 郑跃胜，任建华，舒胜文，等. 空气湿度对非均匀交流电场下短间隙击穿特性的影响[J]. 高电压技术，2019，45(5)：1352-1359.
ZHENG Yuesheng, REN Jianhua, SHU Shengwen, et al. Effect of air humidity on breakdown characteristics of short gaps under alternating non-uniform electric fields[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1352-1359.

[12] 贾 磊，王婷婷，肖 微，等. 基于油枕空气湿度感知的变压器套管受潮在线监测方法[J]. 高电压技术，2020，46(9)：3114-3123.
JIA Lei, WANG Tingting, XIAO Wei, et al. On-line monitoring method for transformer bushings with moisture based on air humidity perception in conservator[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3114-3123.

[13] 张俊民，侯振华，张春朋，等. 27.5 kV GIS 母线室三维温度场的数值计算[J]. 电工技术学报，2011，26(12)：62-67.
ZHANG Junmin, HOU Zhenhua, ZHANG Chunpeng, et al. Three dimensional thermal field numerical calculation of 27.5 kV gas-insulated switchgear bus bar's cabinet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 62-67.

[14] 王增彬，王 睿，姚聪伟，等. 强制对流散热对开关柜温升影响规律的仿真研究[J]. 高电压技术，2021，47(3)：1064-1074.
WANG Zengbin, WANG Rui, YAO Congwei, et al. Simulation study on the influence of forced convection heat dissipation on temperature rise of switch-gear[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1064-1074.

[15] 汪 倩，屈建宇，吴 刚，等. 配电开关柜温升特性的多物理场仿真和实验[J]. 高电压技术，2016，42(6)：1775-1780.
WANG Qian, QU Jianyu, WU Gang, et al. Multi-physical field simulation and experiment of temperature-rise characteristics of switchgear compartment[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1775-1780.

[16] 彭 涛，唐炳南，赵莉华，等. 中压开关柜典型接触故障下的温升特性研究[J]. 高电压技术，2021，47(12)：4331-4340.
PENG Tao, TANG Bingnan, ZHAO Lihua, et al. Study on the temperature rise characteristics of medium-voltage switchgear under typical contact failure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4331-4340.

[17] WANG L J, LI X L, LIN J, et al. Studies of modeling and simulation method of temperature rise in medium-voltage switchgear and its optimum design[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018, 8(3): 439-446.

[18] 马信友，王立军，王 睿，等. 故障条件下中压开关柜温升特性的仿真研究[J]. 高电压技术，2022，48(6)：2276-2282.
MA Xinyou, WANG Lijun, WANG Rui, et al. Simulation study of temperature rise characteristics of medium voltage switchgear under fault conditions[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2276-2282.

[19] 任君鹏，王 栋，杜志叶，等. 强迫空气冷却高压开关柜三维气流——温升仿真分析[J]. 高压电器，2017，53(10)：12-18.
REN Junpeng, WANG Dong, DU Zhiye, et al. Simulation analysis of 3-D airflow-temperature rise for high-voltage switchgear under forced air cooling[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 12-18.

[20] 李 元，薛建议，任双赞，等. 高压开关柜温湿度分布的三维数值模拟研究[J]. 电工技术学报，2019，34(24)：5095-5103.
LI Yuan, XUE Jianyi, REN Shuangzan, et al. Research on 3D numerical simulation of temperature and humidity distribution inside high voltage switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24): 5095-5103.

[21] 杨 芳，潘岐泽. 12 kV 高压开关柜受潮凝露防治技术研究[J]. 高压电器，2018，54(8)：40-47.
YANG Fang, PAN Qize. Key technologies investigation of damp-proofing and anti-dewing for 12 kV high-voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 40-47.

[22] 罗宣国，夏丽建. 电气设备的防凝露技术研究[J]. 可再生能源，

2014，32(4)：489-492.
LUO Xuanguo, XIA Lijian. Research on dewing prevention technology for electrical-equipment[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(4): 489-492.
[23] 孙兴丽，刘曙光. 一种开关柜智能操控装置的设计与实现[J]. 高压电器，2009，45(1)：76-80.
SUN Xingli, LIU Shuguang. Design and implementation of a intelligent manipulation device for switchboard[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 76-80.
[24] 周丰群，张义民，何　超. 电气设备用温度凝露控制器的研制[J]. 电力自动化设备，2002，22(3)：61-62，67.
ZHOU Fengqun, ZHANG Yimin, HE Chao. Development of temperature and dewing controller for electric equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(3): 61-62, 67.
[25] 岳新峰. 12 kV 中置柜加热除湿方式探讨[J]. 高压电器，2002，38(3)：57-58.
YUE Xinfeng. Discussion about the heating and dehumidification style in 12 kV switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 57-58.



舒胜文(通信作者)
1987—，男，博士(后)，副教授
主要从事绝缘机理与故障诊断、防灾减灾方面的研究工作
E-mail: shushengwen@fzu.edu.cn

SHU Shengwen
Post-doctorate
Associate professor
Corresponding author



占兆璇
2000—，女，硕士生
主要从事高电压与绝缘技术方面的研究工作
E-mail: 1186893062@qq.com

ZHAN Zhaoxuan



许俊炜
1998—，男，硕士生
主要从事高电压试验技术、高压设备绝缘等方面的研究工作
E-mail: 1138789823@qq.com

XU Junwei



黄　勇
1997—，男，硕士
主要从事高电压与绝缘技术方面的研究工作
E-mail: 2766280935@qq.com

HUANG Yong

收稿日期　2022-06-08　修回日期　2022-07-05　　编辑　曾文君