

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.06.002

绝缘热管在大容量环保充气式开关柜应用可行性分析

费翔, 朱志豪, 孙河南, 郭锋, 卢留洋, 张庆飞

(平高集团有限公司, 河南 平顶山 467000)

摘要:文中首先针对热管传热原理进行了研究,基于CFD建模和仿真探寻了热管内部液态和气态工作介质冷凝蒸发的相互作用过程,通过与铜棒对比相同边界条件下的冷热端温度差和热阻,验证了热管高导热性的特点。然后对大容量充气式开关柜的温升传热过程进行了分析,对采用了热管结构的充气柜,在进行温度场仿真分析时将热管模型进行等效处理,忽略内部较为复杂的相变传热过程,可大幅提高计算效率,并通过试验验证了与气流场仿真结果的偏差在10%以内。最后提出了一种提高热管工作效率的绝缘热管结构,通过合理设计内部腔体、铜管散件和冷热段传热基座,并选用合适的工作液介质,使其同时满足绝缘和传热的要求,应用在12 kV/4 000 A环保充气柜上,顺利通过了绝缘和1.1倍温升试验考核。

关键词:绝缘热管;大容量;充气式开关柜;散热设计;工质;热传导系数;相变传热;热阻

Feasibility Analysis on Application of Insulated Heat Pipe in Large Capacity Environment-friendly C-GIS

FEI Xiang, ZHU Zhihao, SUN Henan, GUO Feng, LU Liuyang, ZHANG Qingfei

(Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467000, China)

Abstract: In this paper, the heat transfer principle of heat pipe is studied firstly, and the interaction process of condensation and evaporation of liquid and gaseous working medium in the heat pipe is studied based on CFD modeling and simulation, the characteristics of high thermal conductivity of the heat pipe are verified by comparing the temperature difference and thermal resistance between the hot and cold end under the same boundary condition with the copper rod. Then, the temperature rise heat transfer process of the large capacity gas-filled switchgear is analyzed. For the gas-filled cabinet adopting heat pipe structure, the heat pipe model is subjected to equivalent treatment in the simulation analysis of temperature field, the calculation efficiency can be greatly improved by neglecting the complicated phase change heat transfer process. The deviation between experiment and simulation results less than 10% is verified by the test. Finally, a kind of insulating heat pipe structure for improving the efficiency of heat pipe is proposed. Through reasonable design of internal cavity, insertion of copper tube and heat transfer base of cold and hot section as well as selection of suitable working fluid medium, the requirements of insulation and heat transfer are met simultaneously. It is applied in 12 kV/4 000 A environment-friendly gas filling cabinet and has passed the test of insulation and 1.1 times temperature rise.

Key words: insulated heat pipe; high-capacity; C-GIS; thermal design; working medium; thermal conductivity coefficient; phase change heat transfer; thermal resistance

收稿日期:2024-01-09; 修回日期:2024-03-24

基金项目:中国电气装备集团有限公司总部科技项目(配电开关及配电变压器提质增效关键技术研究)。

Project Supported by China Electrical Equipment Group Corporation Headquarters Science and Technology Project(Key Technology Research on Improving Quality and Efficiency of Distribution Switch and Distribution Transformer).

0 引言

随着中国经济的持续发展和城镇化建设加速,主网和配网的用电负荷快速增长,电能密度不断提高,变电站的主变容量越来越大,长三角、珠三角等经济发达地区的主变容量基本形成以 50、63 MVA 为主流的网架结构,10 kV 侧开关设备的额定电流达到 3 150、4 000 A 或更高,由此引起设备焦耳损耗和铁磁损耗增加,一次导体的发热功率可达到 1 500~2 500 W。

充气式开关柜由于一次导体外部密封在气箱中,内部对流换热效率低,热量不能及时传递至外部,导致温升超标。部分厂家采用了在导体和气箱壁板上安装散热片、喷涂高辐射率黑色涂层、优化柜体散热通道和增加强制冷却等手段辅助散热,在 3 150 A 及以下的充气柜上取得了一定效果^[1-12]。随着额定电流提升到 4 000 A,尤其是使用环保替代气体时,气箱内部自然对流速度低(<0.5 m/s)、气体和壁板热阻大、替代气体密度小,同体积下的换热效率低等问题更加明显,采用上述传统辅助散热方法的经济性不高,且散热效率很难达到设计预期,给通流设计带来困难。

热管是一种在密闭空间内通过两次简单汽液相变实现被动热量传递的传热元件,目前已应用在电子器件、工业余热回收、化学反应器、岩土工程、核安全等多领域。热管在高压开关行业也有一些应用,主要集中在大电流开关柜产品上,通常安装在隔离静触头等发热集中部位,从试验结果看,冷凝段在通风良好的情况下,降温可达 10 K 以上,而通风不好的情况下,效果不明显,只有 3~6 K^[13-18],没有充分发挥出热管热量传递效率高、速度快的优点。尤其针对充气式开关柜,密封气箱的结构使得发热元件周围无法通风,制约了热管在充气式开关柜上的应用。

Dieter Braun 等人研究了一种新型的热管冷却方法,在 ABB 公司生产的 24 kV HECS-130L 发电机断路器上采用氢氟醚介质填充的绝缘热管,依靠环路热管进行循环散热,经测试温升下降了 30~40 K,通流能力从 13 000 A 提升到了 23 000 A^[19]。这种新型热管,由于自身满足绝缘性能要求,蒸发段与高压侧发热导体连接,冷凝段与接地侧散热器连接,与传统热管应用相比,可以有效避免依靠热阻较大的气体介质和金属隔板进行传热,充分发挥热管自身优势。

文中将从散热、绝缘、试验和结构等方面进行分析,探讨大电流充气式开关柜应用绝缘热管的可行性。

1 热管 CFD 仿真建模与分析

依靠重力回流的热管典型结构见图 1。在长度方向上可以将其划分为蒸发段、绝热段和冷凝段。蒸发段吸收热源,将内部负压的工作介质加热至沸点,工作介质由液态转变为气态,吸收大量热,气态介质向上运动经过绝热段到达冷凝段,冷凝段一般辅以较强的散热装置,使气态介质迅速冷却至液态,从而释放出大量热,液态介质在重力下回流至蒸发段,如此周而复始。

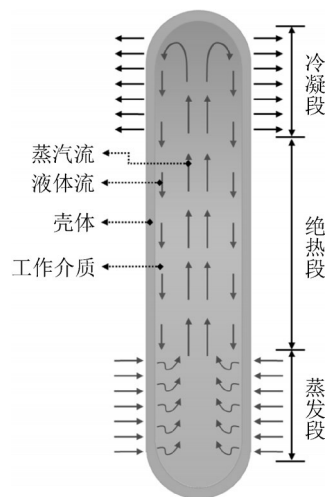


图1 热管示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat pipe

由此可见,热管依靠两次相变将蒸发段集中的热量高效率地传输至冷凝段,其等效导热系数通常可达 10 000~100 000 W/(m·K),约是铜的 250 倍,铝的 500 倍。根据应用场合温度的不同,热管可以划分成低温、常温、中温和高温热管,其内部充有的工作介质和外部密封壳体材料也有不同,见表 1。开关柜的使用环境温度在 -25~40 ℃,最大温升为 75 K,从经济性和适用范围看,常规热管选择水比较合适。

表1 热管工作介质和分类

Table 1 Working medium and classification of heat pipes

热管种类	工作介质	工作温度/℃	相容壳体材料
低温热管	氟利昂 134a	-30~50	铝、不锈钢、铜
	氟利昂 141b	-10~70	
常温热管	乙醇	0~130	不锈钢、铜、碳钢
	水	30~250	
中温热管	硫	250~550	奥氏体不锈钢
高温热管	钾	400~1 000	不锈钢
	锂	1 000~1 800	钨、钽、钼、铌

1.1 几何模型

采用二维平面计算模型见图2。图2中,蒸发段、绝热段长度为50 mm,冷凝段长度为400 mm,热管直径22 mm,单边壁厚0.5 mm。管壳材质为纯铜,内部工作介质为蒸馏水。

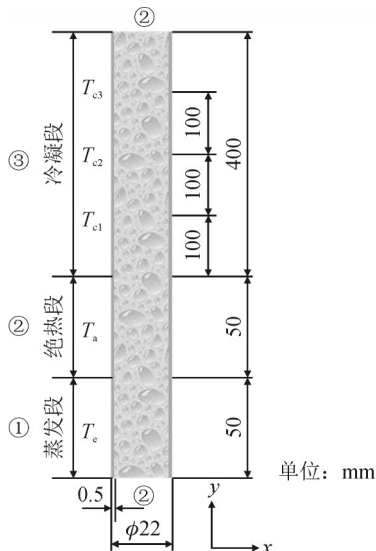


图2 热管几何模型示意图

Fig. 2 Geometric model diagram of heat pipe

1.2 控制方程

由于热管内部的流体包括气相、液相两种状态,与外壳交界处为固体壁面,采用VOF两相流模型来分析内部工作介质的流动和相变传热过程,引入连续表面张力模型^[20-25],计算气-液界面相互作用力影响。

VOF模型是一种应用于固定欧拉网格的表面跟踪技术,可用于两种或多种不混溶的流体,流体共享一组动量方程,在整个域中跟踪计算单元中每种流体的体积分数,所有相都被视为相互连通的连续介质,各相体积分数之和为1。这种方法比较适合模拟热管中气泡的运动和热量交换过程。控制方程包括流体流动的质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程,对于相变过程中产生的质量、能量转移采用源项的形式添加至守恒方程中。

1)连续性方程为

$$\frac{\partial(\alpha\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho\mathbf{u}) = S_M \quad (1)$$

式(1)中: α 为工作介质的体积分数; ρ 为工作介质的密度,kg/m³; $\mathbf{u}$ 为速度矢量; S_M 为工作介质的质量源项,kg/m³。

蒸发过程中的质量传递源项满足:

$$\text{液相} \quad S_M = -0.1\rho_l\alpha_l \frac{T_{\text{mix}} - T_{\text{sat}}}{T_{\text{sat}}} \quad (2)$$

$$\text{气相} \quad S_M = 0.1\rho_g\alpha_g \frac{T_{\text{mix}} - T_{\text{sat}}}{T_{\text{sat}}} \quad (3)$$

冷凝过程中的质量传递源项满足:

$$\text{液相} \quad S_M = 0.1\rho_v\alpha_v \frac{T_{\text{sat}} - T_{\text{mix}}}{T_{\text{sat}}} \quad (4)$$

$$\text{气相} \quad S_M = -0.1\rho_v\alpha_v \frac{T_{\text{sat}} - T_{\text{mix}}}{T_{\text{sat}}} \quad (5)$$

式(2)-(5)中: T_{mix} 为气液混合工质温度,K; T_{sat} 为气液混合工质的饱和温度,K; ρ_v 、 ρ_l 为气、液相工质的密度,kg/m³; α_v 、 α_l 为气、液相工质的体积分数。

2)动量方程为

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\mathbf{u}) = \rho\mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla\mathbf{u} + \mathbf{u}\nabla)] + F_{\text{CSF}} \quad (6)$$

式(6)中: p 为压力,Pa; $\mathbf{g}$ 为重力加速度,m/s²; μ 为动力粘度,Pa·s; F_{CSF} 为表面张力,N/m。引入由Brackbill^[26-29]等人提出的连续表面张力模型,表面张力为

$$F_{\text{CSF}} = 2\sigma_{\text{lv}} \frac{\alpha_l\rho_l C_v \nabla\alpha_v + \alpha_v\rho_v C_l \nabla\alpha_l}{\rho_l + \rho_v} \quad (7)$$

式(7)中: C 为气液相的表面曲率; σ_{lv} 为表面张力系数,N/m,水的表面张力系数取0.072 N/m。

3)能量方程为

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [(\rho E + p)\mathbf{u}] = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \quad (8)$$

式(8)中: E 为内能,J/kg; λ 为导热系数,W/m·K; S_E 为能量源项,即蒸发冷凝过程中的热量,J/m³·s。蒸发和冷凝过程中的能量源项满足:

$$S_{\text{EE}} = S_{\text{ME}} \cdot LH \quad (9)$$

$$S_{\text{EC}} = S_{\text{MC}} \cdot LH \quad (10)$$

式(9)、(10)中, LH 为蒸发潜热,J/kg。

1.3 边界条件

热管传热实验,见图3。

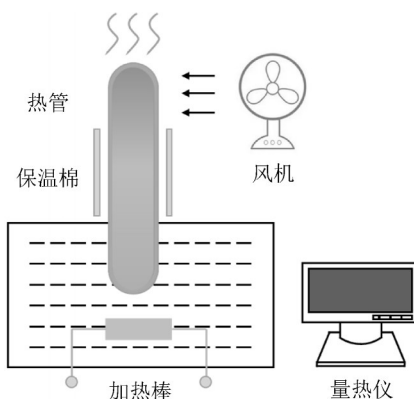


图3 热管传热实验

Fig. 3 Heat transfer experiments of heat pipe

热管CFD计算的边界条件如下。

1)蒸发段,热流密度 q 满足第2类边界条件为

$$q_e = -(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) = \frac{Q_e}{2\pi r L_e} \quad (11)$$

式(11)中: Q_e 为蒸发段输入热源热量, W; q_e 为蒸发段热流密度, W/m^2 ; L_e 为蒸发段长度, mm; r 为热管外径, mm。

2) 绝热段和热管两端面。热流密度 q 为零

$$q = -\lambda(\frac{\partial T}{\partial y}) = 0 \quad (12)$$

3) 冷凝段。与外界空气对流传热满足第3类边界条件为

$$q_c = h_c(T_c - T_\infty) = \frac{Q_c}{2\pi r L_c}(T_c - T_\infty) \quad (13)$$

式(13)中: Q_c 为冷凝段散出热量, W; q_c 为冷凝段热流密度, W/m^2 ; L_c 为冷凝段长度, mm; h_c 为平均对流传热系数, $W/m^2 \cdot K$; T_c 为冷凝段的平均温度, K; T_∞ 为冷凝段周围空气温度, K。

由图3可知, 为明确热管边界条件数值, 进行了不同输入功率下的冷凝传热测试实验。实验时蒸发段放置在加热池中, 加热池内放置功率可调电加热棒, 绝热段采用保温棉包裹, 冷凝段采用强制风冷, 蒸发段、冷凝段的热功率采用差示扫描量热仪进行等效测量。根据实验数据换算得出了冷凝段对流传热系数见表2。

表2 不同输入功率下冷凝段换热系数

Table 2 Heat transfer coefficient of condensing section under different input power

蒸发段输入功率 Q_e/W	冷凝段空气温度 $T_\infty/^\circ C$	冷凝段		
		散发热量 Q_c/W	平均温度 $T_c/^\circ C$	对流传热系数 $h_c/[W \cdot (m^{-2} \cdot K)^{-1}]$
50	20.1	43.5	51.2	50.6
100	25.2	83.2	60.2	85.9
150	35.5	127.6	72.1	126.1
200	40.6	165.3	78.3	158.6

1.4 计算结果分析

以蒸发段输入功率 50 W, 充液率 20% 为例, 利用 Fluent 软件对热管的蒸发冷凝过程进行仿真, 为对比热管与纯铜传热的差异性, 采用相同边界条件, 对相同尺寸的铜棒(直径 23 mm, 高度 500 mm)进行静态热分析, 计算结果见图4、5。

对于热管, 初始阶段存在工作液, 热量从蒸发段沿铜管壁传输至冷凝段, 对冷凝段附近空气进行加热升温。随着时间推移, 从图4(b)中可以看到冷凝段管壁有明显的层状冷凝壁膜, 气态工质冷凝成液态, 在重力下自由向下回流, 由于蒸发和液化相变的存在, 需经历较长时间才能达到热平衡。平衡

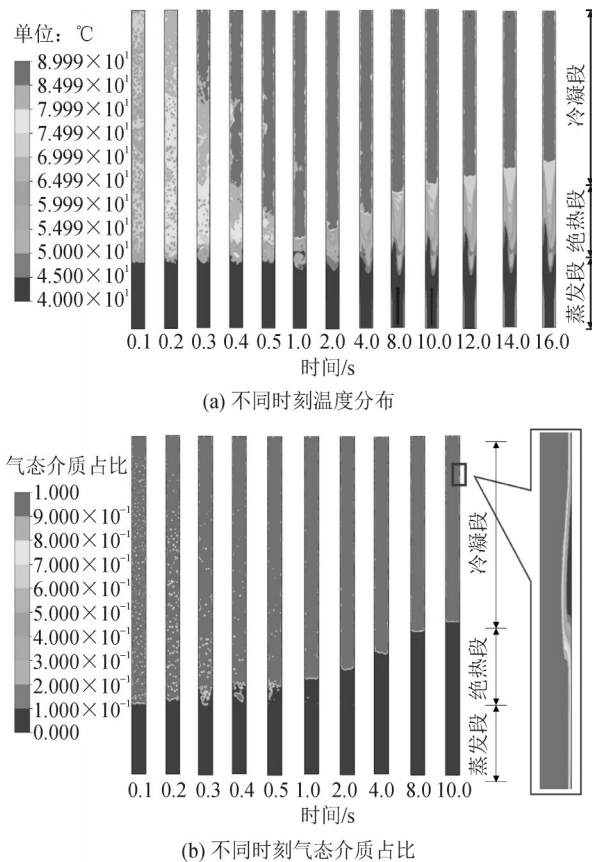


图4 热管CFD瞬态计算结果

Fig. 4 Transient CFD simulation results of heat pipe

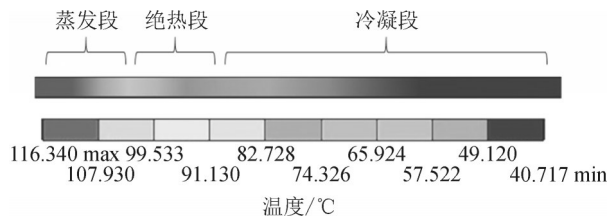


图5 纯铜棒静态传热计算结果

Fig. 5 Static simulation results of copper bar

时的轴向温度分布对比见图6, 热管冷端和热端的温差明显小于铜棒, 传热效果更好。

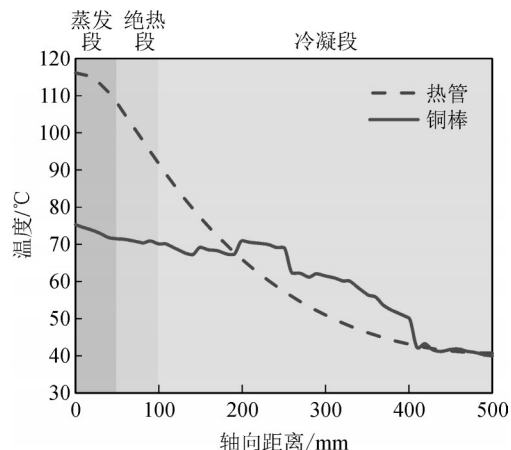


图6 轴向温度分布对比

Fig. 6 Comparison of axial temperature distribution

热阻反映了物体对热传导的阻碍能力,与传导路径长度成正比,与通过的截面积成反比,与材料的导热系数成正比,满足公式

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{L}{\lambda S} \quad (14)$$

对于热管,冷凝段和蒸发段温差 $\Delta T = 35.3 \text{ K}$, 在 50 W 输入热源下的热阻 $R = 35.3/50 = 0.71 \text{ K/W}$ 。对于纯铜棒,冷端和热端温差 $\Delta T = 75.62 \text{ K}$, 在 50 W 输入热源下的热阻 $R = 75.62/50 = 1.51 \text{ K/W}$ 。从热阻大小对比看,热管等效热阻是纯铜的47.02%。当热管充液率、工作介质和数量不同时,比例也会产生变化。

2 热管等效散热分析与试验

2.1 传热分析

对于充气式开关柜,气箱内部导体发热后热量传输至气箱外部大气中,整个传热原理可以等效成见图7^[30]。高压导体通过电流产生焦耳热,导体之间通过热传导传热,导体通过辐射和对流向气箱内部气体传热,气箱侧壁厚度方向上通过热传导传热,气箱外部与大气通过辐射和对流传热。3种传热方式都会产生热阻,其中气体介质中的对流、气箱侧壁的热传导热阻是制约充气式开关柜散热能力提升的关键。以某12 kV/3 150 A充气柜试验数据为例,气箱内部导体温度达到70~80℃时,气箱外壁温度只有40~50℃,温差达到30℃,气体介质两侧和气箱内外部温度梯度大,热量得不到有效传输。

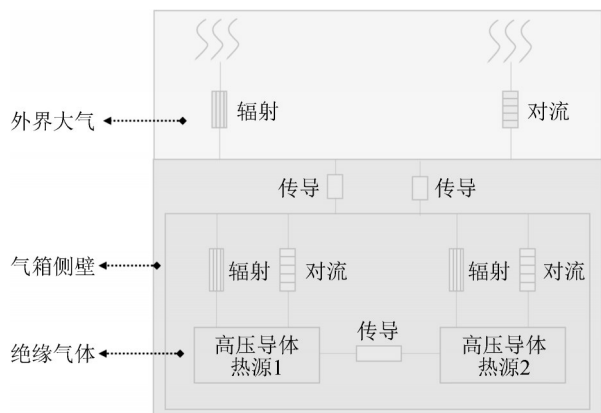


图7 充气式开关柜传热原理图

Fig. 7 Heat transfer schematic diagram of C-GIS

2.2 热管等效处理

对于采用了热管的充气式开关柜,热管壁面外侧与气箱内部气体为对流传热,热管壁面内部的气态和液态工作介质通过冷凝—蒸发相变传热,在进行开关柜整体温度场仿真时,如果同时考虑热管外部的对流传热和内部的相变传热,计算过程非常

长,计算效率低,不适合作为产品设计的辅助手段。根据前文2.4的分析,相同尺寸的铜棒和热管对比,热管两端的温差小于铜棒,热量在热管上的传输热阻远小于铜棒,因此在进行带有热管模型的开关柜整体温度场仿真时,可以给热管模型设置一个较大的等效导热系数,见表3,代替采用VOF模型进行复杂的相变传热分析,有效节省计算资源,提高仿真效率。

表3 热管等材料的物性参数

Table 3 Parameters of working fluid of heat pipe

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热/[$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	热导率/[$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]
热管	1	1	20 000
纯铜	8 954	383	381
纯铝	2 700	896	204
不锈钢	7 800	473	43.0
环氧树脂	1 900	789	0.4

按照表3提供的物性参数,对图8的试验模型利用Ansys Icepak进行温度场仿真^[31-33],见图9。从图9对比看,相差在10%以内,这表明将热管模型处理成一个具有特定导热系数的实体参与后续的温度场、气流场仿真并得出产品的温度分布,在工程计算上的精度是可以接受的。

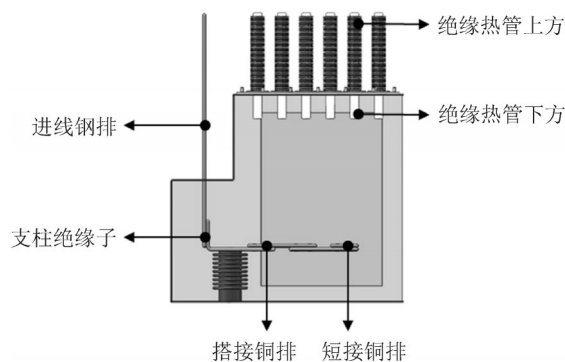


图8 热管散热模拟试验模型

Fig. 8 Heat pipe heat dissipation simulation test model

3 热管绝缘性能分析

3.1 绝缘热管构成

为了提高热管的工作效率,提出一种典型的绝缘热管结构见图10。其蒸发段铜管与充气式开关柜的高压发热导体直连,冷凝段铜管与气箱壳体上的散热器直连。高压侧和低压侧之间依靠绝缘套管和工作介质保持绝缘水平,套管采用环氧树脂两侧固封螺纹嵌件构成,根据散热功率要求制作不同长度。考虑到套管材质与工作介质相容性,除了环氧树脂内表面涂覆特殊耐腐蚀涂料的举措外,还可采

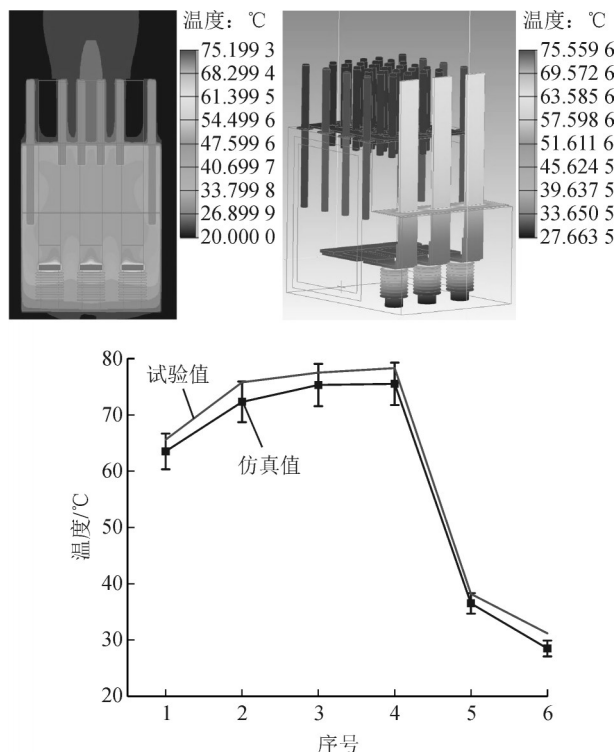


图9 仿真和试验结果对比

Fig. 9 Comparison of simulation and experimental results
用化学稳定性较好的陶瓷材料,两侧螺纹嵌件采用可伐合金封接工艺或不锈钢钎焊工艺与陶瓷连接。

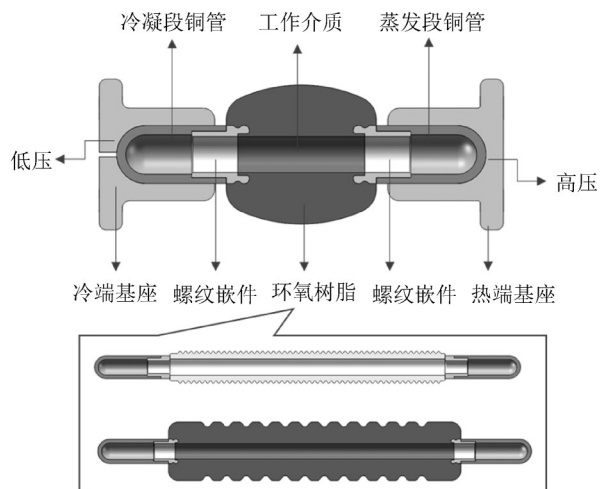


图10 一种绝缘热管组成

Fig. 10 Structure of an insulating heat pipe

3.2 绝缘工作介质选择

绝缘工作介质的选择需要考虑两方面,一是与基材壳体(如玻璃、金属、陶瓷等)有良好的材料兼容性,二是安全环保性。某公司生产的氢氟醚系电子氟化液的物性参数见表4。表4中: GWP 为全球变暖潜能值; ODP 为臭氧破坏潜能值。从表4中可以看出,3种氟化液的沸点温度在50~100℃,比较符合充气式开关柜的工作环境,且介电性能较好,耐电强度达到10 kV/mm。3种氟化液都具有低 GWP 和

零 ODP ,是一种较为环保的冷媒绝缘介质。

表4 氢氟醚系液态绝缘工质参数

Table 4 Parameters of working fluid of hydrofluoroether

参数	Novec7100	Novec7200	Novec7300
沸点温度/℃	61	76	98
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 510	1 420	1 660
表面张力/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.013 6	0.013 6	0.015 0
耐电强度/($\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$)	>10	>10	>10
相对介电常数	7.7	7.3	6.1
GWP	297	57	310
ODP	0	0	0

3.3 绝缘热管电场分析

以12 kV 环保干燥空气绝缘充气式开关柜用绝缘热管为例,设计的环氧树脂部分高度为65 mm,最大直径60 mm。根据DL/T 593—2016的要求,工频耐压值为42 kV,雷电冲击耐压值为75 kV^[34]。对图7所示绝缘热管结构进行电场仿真,其结果见图11。

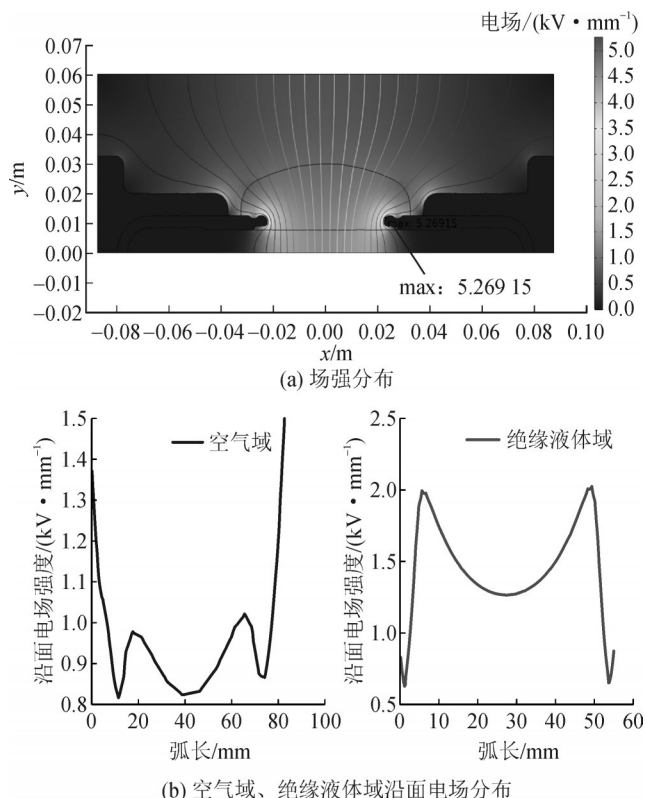


图11 12 kV 绝缘热管电场分布

Fig. 11 Electric field distribution of 12 kV heat pipe

1)环氧树脂中的最大电场为5.27 kV/mm,远小于环氧材料的耐电强度20~30 kV/mm,绝缘裕度较大。

2)绝缘液体(以 Novec7200 为例)中沿面电场最大值为2.0 kV/mm,与表3所列 Novec7200 的耐电强度>10 kV/mm 相比,仍有绝缘裕度。

3)空气域沿面电场最大值 1.5 kV/mm。20℃

1个标准大气压下,均匀电场中干燥空气击穿判据 $3\text{ kV/mm}^{[35-37]}$,绝缘热管外绝缘满足最低功能压力为零表压的干燥空气绝缘充气柜使用要求。

3.4 整机温升试验

基于前述的分析,文中采用自主设计的绝缘热管应用在 $12\text{ kV}/4\text{ 000 A}$ 环保充气柜产品中,基于该产品进行了绝缘和 $1.1\times 4\text{ 000 A}$ 温升试验,带风机顺利通过,裕度可达到 5 K ,关键点的温度分布见图12。其中序号27-36位于三工位触头滑动连接部位,温升要求为 65 K 。

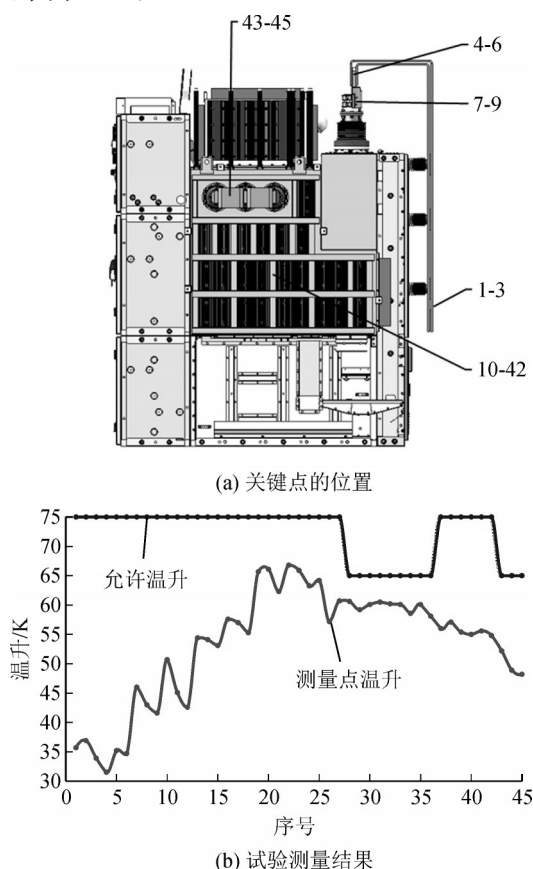


图12 $12\text{ kV}/4\text{ 000 A}$ 环保充气柜测温关键点和试验
Fig. 12 Key points and tests results for temperature rise of $12\text{ kV}/4\text{ 000 A}$ C-GIS

4 结论

文中对常规重力热管进行了CFD建模及仿真,基于仿真和试验结果做出了热管参与开关柜温度场仿真分析的简化模型假设,并验证了简化计算的精度。为提升热管工作效率,提出了一种 12 kV 绝缘热管,并对其应用在 $12\text{ kV}/4\text{ 000 A}$ 环保充气式开关柜可行性进行了分析和试验,得出了如下结论:

1)相同尺寸的铜棒和热管参与传热,在热源和冷端对流换热系数相同的情况下,热管两端的温差要低于铜棒,以文中假设的边界条件,热管的热阻

为铜棒的 47.02% ,传热效率高于后者。

2)在带有热管的充气柜整体进行温度场仿真时,为简化计算模型,提高计算效率,可以将热管等效成一个具有特定导热系数的实体模型参与流场计算。文中给出的热管导热率为 $20\text{ 000 W/(m}\cdot\text{K)}$,仿真和试验结果偏差在 10% 以内。

3)绝缘热管通过合理设计内部腔体、铜管嵌件和冷热段传热基座,并选用合适的工作液介质,可以同时满足开关柜绝缘和传热的要求。文中采用了最大直径 60 mm ,环氧树脂高度 65 mm 的绝缘热管,并在 $12\text{ kV}/4\text{ 000 A}$ 环保充气柜产品上进行了验证,顺利通过了绝缘和 1.1 倍温升试验。

参考文献:

- [1] 曹叶飞,朱晓东,谭 燕. 大电流中压金属交流气体绝缘金属封闭开关设备的散热结构设计[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 200-206.
CAO Yefei, ZHU Xiaodong, TAN Yan. Design of heat dissipation structure for high current medium voltage AC gas-insulated metal-enclosed switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 200-206.
- [2] 吴小忠,顾晓东,郭建刚,等. 氮气绝缘开关柜大电流温升控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3): 92-99.
WU Xiaozhong, GU Xiaodong, GUO Jiangan, et al. Temperature rise control technology of high current environment in N_2 gas switchgear[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 92-99.
- [3] 厉复新,李首领,刘卫涛. C-GIS产品的温升研究[J]. 中国新技术新产品, 2019(15): 59-60.
LI Fuxin, LI Shouling, LIU Weitao. Research of temperature rise in C-GIS[J]. China New Products and Technologies, 2019(15): 59-60.
- [4] 徐慧强,李 猛,杨镇宁. 环保气体绝缘开关设备温升控制方法研究[J]. 机电工程技术, 2020, 49(8): 66-69.
XU Huiqiang, LI Meng, YANG Zhenning. The research of temperature rise control technology of green gas insulated switching[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2020, 49(8): 66-69.
- [5] 兰 剑,冯 英,李向阳,等. 干燥空气, N_2 和 SF_6 3种气体绝缘环网柜温升性能的试验对比研究[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 64-71.
LAN Jian, FENG Ying, LI Xiangyang, et al. Experimental comparative study of the temperature rise performance of dry air, N_2 and SF_6 gas-insulated RMU[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 64-71.
- [6] 张国跃,朱志豪,费 翔,等. 新型 $40.5\text{ kV } 2\text{ 500 A}$ 干燥空气绝缘充气柜温升控制研究[J]. 高压电器, 2023, 59(9): 91-98.

- ZHANG Guoyue, ZHU Zhihao, FEI Xiang, et al. Study on temperature rise control of new type 40.5 kV 2 500 A dry air insulated switchgear cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(9): 91-98.
- [7] 崔文军, 张交锁. 无SF₆气体绝缘开关设备中干燥空气作为绝缘介质的使用[J]. 高压电器, 2016, 52(12): 221-226. CUI Wenjun, ZHANG Jiaosuo. Dry air as insulation gas in SF₆-free gas insulated switchgears[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12): 221-226.
- [8] 刘东超, 陈志刚, 崔龙飞. 基于物联网的环网柜在线监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 60-67. LIU Dongchao, CHEN Zhigang, CUI Longfei. Online monitoring technology of a ring network cabinet based on the internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 60-67.
- [9] 兰剑, 冯英, 李向阳, 等. 中压环保气体绝缘金属封闭开关设备研究现状[J]. 供用电, 2018, 35(11): 72-77. LAN Jian, FENG Ying, LI Xiangyang, et al. Review of medium voltage environment-friendly gas-insulated metal-enclosed switchgears[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(11): 72-77.
- [10] 朱金华, 谢成, 邵先军, 等. C₄F₇N 环保气体性能分析及其在环网柜中的应用展望[J]. 浙江电力, 2022, 41(1): 1-9. ZHU Jinhua, XIE Cheng, SHAO Xianjun, et al. Analysis on the performance of C₄F₇N environmental gas and its application prospect in ring main units[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(1): 1-9.
- [11] 王维, 鲁海亮, 王羽, 等. 垂直型直流接地极温升特性及计算方法研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(12): 7-12. WANG Wei, LU Hailiang, WANG Yu, et al. Research on temperature rise characteristics and calculation methods of vertical DC grounding electrodes[J]. Smart Power, 2022, 50(12): 7-12.
- [12] 兰剑, 韩冬, 冯英, 等. 基于幂函数模型的高压开关柜温升预测与试验研究[J]. 高压电器, 2023, 59(10): 96-103. LAN Jian, HAN Dong, FENG Ying, et al. Study on temperature rise prediction and test of high voltage switchgear cabinet based on power function model[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 96-103.
- [13] 薛继鹏. 大电流开关柜触头热管散热关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016. XUE Jipeng. Study on heat dissipation of high current switchgear contacts with heat pipe technology[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [14] 张登, 薛继鹏, 王永源, 等. 基于热管散热的大电流开关柜触头温度场分析[J]. 云南电力技术, 2016, 44(3): 80-83. ZHANG Deng, XUE Jipeng, WANG Yongyuan, et al. Analysis of contacts temperature field in large current switchgear based on heat pipe[J]. Yunnan Electric Power, 2016, 44(3): 80-83.
- [15] 周文文. 外覆绝缘材料的高压开关柜接头温度监测技术[J]. 电器与能效管理技术, 2021(4): 46-51. ZHOU Wenwen. Joint temperature monitoring technology of high voltage switchgear covered with insulation materials[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(4): 46-51.
- [16] 林超. 基于热管技术的大电流开关柜散热驱潮系统设计[J]. 通信电源技术, 2018, 35(8): 119-121. LIN Chao. Design method of heat dissipation and tide displacement system for large current switchgear based on heat pipe technology[J]. Telecom Power Technology, 2018, 35(8): 119-121.
- [17] 薛继鹏, 唐景春. 大电流开关柜热管散热实验研究[J]. 合肥工业大学学报, 2017, 40(11): 1474-1477. XUE Jipeng, TANG Jingchun. Experimental study of thermal dissipation of large current switchgear with heat pipe[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2017, 40(11): 1474-1477.
- [18] 刘国特, 宋新明, 江栩铄, 等. 高压开关柜复合毛细管增容热管蒸发器性能与结构优化[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 518-524. LIU Guote, SONG Xinming, JIANG Xushuo, et al. Structure optimization and performance of composite capillary heat exchanger for high voltage switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 518-524.
- [19] BRAUN D, LAKNER M, MAUROUX J C. Heat pipes - a novel cooling principle for generator circuit-breakers[J]. VGB Power Tech., 2009, 89(6): 69-72.
- [20] 余清远, 赵鹏程, 马誉高. 基于CFD方法的高温热管特性研究[J]. 核动力工程, 2022, 43(2): 70-76. YU Qingyuan, ZHAO Pengcheng, MA Yugao. CFD analysis on characteristics of high temperature heat pipe[J]. Nuclear Power Engineering, 2022, 43(2): 70-76.
- [21] 张雨婷, 孙亮亮, 闵皖东, 等. 重力热管传热特性及其数值研究综述[J]. 制冷与空调, 2022, 36(3): 359-370. ZHANG Yuting, SUN Liangliang, MIN Wandong, et al. Review on heat-transfer characteristics and numerical research of the two-phase closed thermosyphon[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2022, 36(3): 359-370.
- [22] 卿倩, 张登春, 陈大伟, 等. 重力热管内部相变传热过程的数值模拟[J]. 矿业工程研究, 2019, 34(4): 57-64. QING Qian, ZHANG Dengchun, CHEN Dawei, et al. Numerical simulation of the phase change heat transfer process in gravitational heat pipe[J]. Mineral Engineering Research, 2019, 34(4): 57-64.
- [23] 张也男, 万超一. 重力热管相变传热性能的数值模拟研究[J]. 低温/制冷技术, 2021, 49(9): 82-94. ZHANG Yenan, WAN Chaoyi. Numerical simulation of

- phase change heat transfer performance of two - phase closed thermosyphon[J]. *Cryogenics/Refrigeration*, 2021, 49(9):82-94.
- [24] 张育民. 基于CFD的热管两相流数学模型与数值模拟[D]. 广州:华南理工大学, 2014.
- ZHANG Yumin. Mathematical model and numerical simulation based on CFD of two - phase flow in heat pipe[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2014.
- [25] 高贺轩. 基于CFD模拟的热管换热器换热性能的优化研究[D]. 辽宁:沈阳建筑大学, 2019.
- GAO Hexuan. Optimization research on heat transfer performance of heat pipe heat exchanger based on CFD simulation[D]. Liaoning:Shenyang Jianzhu University, 2019.
- [26] FADHL B, WROBEL L C, JOUHARA H. CFD modelling of a two - phase closed thermosyphon charged with R134a and R404a[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015(78): 482-490.
- [27] ALIZADEHDAKHEL A, RAHIMI M, ALSAIRAFI A A. CFD modeling of flow and heat transfer in a thermosyphon [J]. *International Communications in Heat & Mass Transfer*, 2010, 37(3):312-318.
- [28] ZUETER A F, NEWMAN G, SASMITO A P. Numerical study on the cooling characteristics of hybrid thermosyphons: Case study of the giant mine, Canada[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 189(4):103313.
- [29] FERTAH S, BOUHAL T, AGROUAZ Y, et al. Performance optimization of a two - phase closed thermosyphon through CFD numerical simulations[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017(128):551-563.
- [30] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Beijing:Higher Education Press, 2006.
- [31] 张俊民, 高荟凯, 冯昊. 三种绝缘气体下开关设备的温度场及流场对比与分析[J]. *电工技术学报*, 2015(6): 155-161.
- ZHANG Junmin, GAO Huikai, FENG Hao, et al. Analysis of thermal and fluid field of switchgear in three insulating gases[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015(6):155-161.
- [32] 陈滇斐, 李呈营, 马宏忠, 等. 大型同步调相机转子故障温度场分析[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(4):192-198.
- CHEN Zhenfei, LI Chengying, MA Hongzhong, et al. Temperature field analysis of rotor fault in large synchronous condenser[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(4): 192-198.
- [33] 付鲁军, 陈雪飞, 辛昭昭, 等. 气体绝缘开关柜多物理耦合场仿真及分析[J]. *高压电器*, 2019, 55(12):44-51.
- FU Lujun, CHEN Xuefei, XIN Zhaozhao, et al. Coupling field simulation and analysis of gas insulated switchgear[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(12):44-51.
- [34] 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求: DL/T 593—2016[S]. 2016.
- Common specifications for high voltage switchgear and control gear standards: DL/T 593—2016[S]. 2016.
- [35] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
- YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2007.
- [36] 李红梅, 周柏杰, 谭东现, 等. 用于环保型C-GIS的氮气及干燥空气正极性雷电冲击特性研究[J]. *高压电器*, 2019, 55(4):25-30.
- LI Hongmei, ZHOU Bojie, TAN Dongxian, et al. Study on positive lightning impulse characteristics of nitrogen and dry air for eco-friendly C-GIS[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(4):25-30.
- [37] 贺建明, 刘坚钢, 易非凡, 等. 开关柜绝缘故障仿真与检测系统研究[J]. *高压电器*, 2022, 58(3):23-28.
- HE Jianming, LIU Jiangang, YI Feifan, et al. Research on simulation and detection system of insulation fault of switchgear cabinet[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(3):23-28.
- 费翔(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事中低压开关电器和成套设备及元件的产品研发工作(E-mail: feixiang091226@qq.com)。