DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.11.022

大温差条件下直流穿墙套管温度场分布特性研究

李艳鹏[1]， 李永祥[1]， 张 昱[1]， 高雨婷[2]， 李军浩[2]
（1. 国网山西省电力公司电力科学研究院，太原 030001；2. 西安交通大学电气学院，西安 710049）

摘要： 直流穿墙套管是特高压换流站连接阀厅和直流场的重要设备，其运行环境特殊，户外侧温度受运行环境影响。对于山西北部，冬季室外温度接近-30 ℃，单日昼夜温差可达30 ℃，研究大温差条件下穿墙套管的绝缘失效机理对于提升套管运行可靠性、制定合理运维策略具有重要意义。文中依据直流穿墙套管实际结构，采用半稳态的计算方法构建了套管热—流耦合仿真模型，对于单一环境温度以及环境温度随时间动态变化时套管内部温度变化情况进行仿真计算，并对比稳态法与半稳态法在计算大温差条件时套管内部各点温度分布差异。仿真结果表明，单一环境温度下，环境温度越低套管内部温差越大，流速分布变化较小。环境温度随时间变化时，套管内部不同位置的温度随时间变化趋势有所不同。半稳态仿真较稳态仿真更接近于真实的温度变化过程，最恶劣的工况出现在环境温度极值处。

关键词： 直流穿墙套管；温度场；热—流耦合；大温差

Research on Temperature Field Distribution Characteristics of DC Wall Bushing Under Large Temperature Difference Conditions

LI Yanpeng[1], LI Yongxiang[1], ZHANG Yu[1], GAO Yuting[2], LI Junhao[2]
(1. Electric Power Research Institute of State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: DC wall bushing is an important equipment for connecting the valve hall and DC field in ultra-high voltage converter stations. Its operating environment is special and the outdoor side temperature is affected by the operating environment. For the northern part of Shanxi province in China, the outdoor temperature in winter is close to −30 ℃ and the diurnal temperature difference can reach 30 ℃. Studying the insulation failure mechanism of wall bushing under large temperature differences is of a great significance for improving bushing operation reliability and formulating resonable operation and maintenance strategies.Based on the actual structure of DC wall bushing in this paper, a semi- steady state calculation method is adopted to construct a thermal fluid coupling simulation model of the bushing. The simulation calculation is carried out for the temperature variation inside the bushing under a single environmental temperature and dynamic changes over time. The temperature distribution differences at various points inside the bushing are compared between the steady state method and the semi- steady state method when calculating large temperature differences. The simulation results show that in case of single ambient temperature, the lower the ambient temperature, the greater the temperature difference inside the bushing, and the smaller the variation in flow velocity distribution. When the ambient temperature changes over time, the trend of temperature variation at different positions inside the bushing varies. The semi- steady state simulation is closer to the real temperature variation process than steady state simulation, and the worst operating conditions occur at the extreme environmental temperature.

Key words: DC wall bushing; temperature field; thermal-fluid coupling; large temperature difference

收稿日期：2026-05-10； **修回日期：**2026-07-23

基金项目：国网山西省电力公司科技项目(52053023000N)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Shanxi Electric Power Company(52053023000N).

0　引言

直流穿墙套管是特高压换流站连接阀厅和直流场的重要设备[1-5]，运行中承载着高电压和大电流，起通流、绝缘和机械支撑等作用。直流穿墙套管故障将直接影响直流工程的送电容量，造成巨大经济损失[6-10]。直流穿墙套管运行环境特殊[11-15]，其户外侧温度受运行环境影响，尤其对于山西北部，冬季室外温度接近-30 ℃，单日昼夜温差可达30 ℃，这种大昼夜温差条件下穿墙套管的绝缘失效机理目前尚不明确。

套管温度场的计算一直以来受到国内外学者的广泛关注。对于套管内部的仿真计算方面，张施令[16]研究了高压干式直流套管的电—热耦合仿真计算，通过半解析理论公式推导建立电热耦合理论模型并与有限元模型在实际套管结构下的电场、温度场计算结果进行对比，证明了有限元电热耦合模型的有效性。王青于[17]应用三维电—热—流耦合场分析法计算了换流变压器干式套管的温度场分布，计算分析三维温度场分布并得到套管内部温度分布规律，并通过400 kV换流变压器干式套管温升试验来验证所用仿真方法的准确性。汤浩[18]研究了特高压直流换流变压器阀侧套管高环温、强电流下轴径向的温度分布规律，测量夏季负荷高峰期800 kV特高压直流金华站换流变压器的运行温度。Xiao Yang等人[19]采用电—热—流耦合的方法，研究了由温度引起SF_6内部电导率分布不均匀从而导致绝缘衬套内部的电场畸变。

综上所述，近年来有限元仿真软件逐渐发展，正常工况下直流穿墙套管的热—流耦合计算已较为深入，然而针对大昼夜温差这种极特殊工况下套管内部绝缘气体温度、流速的研究仍有不足，大温差条件下穿墙套管绝缘失效机理目前尚未明确。由于稳态仿真较瞬态仿真难度低且需求广，目前直流穿墙套管的热—流耦合主要集中在对于单一环境温度下的稳态仿真，环境温度随时间大幅度变化是否会对于套管内部绝缘状态造成影响，其影响程度如何尚待研究，有必要对此进行深入计算分析。因此，针对大温差条件下直流穿墙套管内部温度、流速分布特性的研究具有重要的现实意义和研究价值[20-25]。

文中以SF_6绝缘环氧树脂浸纸电容式直流穿墙套管为研究对象，结合实际工况，在保证户外侧温度、流速分布的基础上简化构建了直流穿墙套管热—流耦合仿真计算模型，分别计算大温差条件下单一环境温度下以及环境温度随时间变化时套管内部温度、流速分布，对于穿墙套管极端工作环境下的绝缘故障诊断具有重要的意义。文中提出半稳态的计算方法，在极大程度节约计算成本的同时更接近套管的真实运行状态，该方法可应用于其他气体绝缘电气设备的仿真计算中。

1　大温差条件下穿墙套管计算模型构建

文中的研究重点在于获得昼夜温差剧烈变化时直流穿墙套管户外侧的温度分布特性，结合400 kV环氧树脂浸纸电容式直流穿墙套管实际结构并对其进行合理简化，构建了直流穿墙套管仿真计算模型。

1.1　气体绝缘直流穿墙套管模型

研究直流穿墙内部温度场时，需建立套管的热—流耦合仿真模型。重力将引起套管内部SF_6自然对流，而重力方向与穿墙套管对称轴方向并不重合，因此不可采用二维轴对称模型对其进行仿真分析。热—流耦合仿真模型主要包含两部分：套管与墙体。根据套管外部几何尺寸及内部电容心子、中心导杆结构参数等，采用有限元分析软件建立阀侧套管三维轴对称模型，见图1。其中，上下两矩形结构为墙体，与穿墙法兰相连接，墙体的几何尺寸需要足够大以模拟现实中套管向墙体的传热过程；套管部分主要包含均压罩、玻璃钢筒、环氧树脂浸纸电容心子、穿墙法兰、中心导杆、SF_6绝缘介质以及其他金属件。实际运行的直流穿墙套管户内外侧通过穿墙法兰或中心导杆上的气孔实现气体交换，这种气体交换对于户外侧气体整体温度、流速分布影响很小，户内、户外侧流体流动关联性很弱，户内侧SF_6绝缘介质的温度、流速分布对于户外侧影响很小。由于文中分析的重点在于大温差条件对于套管内部温度的影响，采用简化几何模型对其进行处理，对套管户内侧进行简化建模，仅保持电容心子建模的完整性而忽略户内侧SF_6绝缘介质。

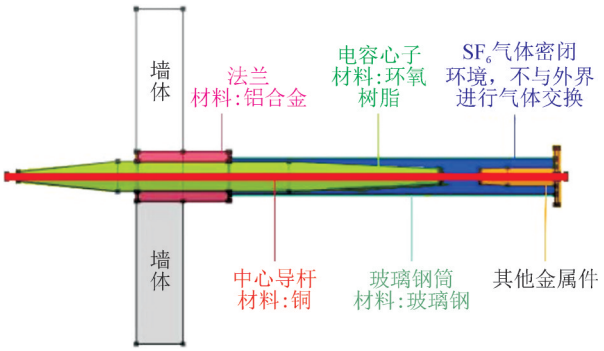


图1　直流穿墙套管仿真模型

Fig. 1　Simulation model of DC wall bushing

1.2　热—流耦合计算模型

直流穿墙套管的热源主要为电流载荷在导流回路引起的焦耳发热，套管导电杆中通入稳定电流，导电杆会产生焦耳热。套管热源产生的热量通过热传导与热对流两种热传递方式将热量散发到周围介质中。

穿墙套管内部的固体和气体之间存在热对流，套管热对流传热满足

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y}=0 \tag{1}$$

动量守恒方程

$$\begin{cases}\dfrac{\partial(\rho v_x v_x)}{\partial x}+\dfrac{\partial(\rho v_y v_y)}{\partial y}=\nabla^2(\mu v_x)-\dfrac{\partial P}{\partial x}+\rho g_x+S_x\\ \dfrac{\partial(\rho v_x v_y)}{\partial x}+\dfrac{\partial(\rho v_y v_y)}{\partial y}=\nabla^2(\mu v_y)-\dfrac{\partial P}{\partial y}+\rho g_y+S_y\end{cases} \tag{2}$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho c v_x T)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho c v_y T)}{\partial y}=\nabla^2(kT)+Q \tag{3}$$

式(1)-(3)中：ρ为流体密度；μ为运动粘性系数；c为比热容；k为导热系数；v_x为流体速度的x分量；v_y为流体速度的y分量；P为流体压力；T为流体温度；S_x、S_y为动量守恒方程中的源项；g_x、g_y为重力造成的加速项；Q为单位截面积中的发热量；∇^2为调和算子。

1.3　热—流耦合半稳态计算模型

研究大的昼夜温差至少需计算环境温度以1 ℃/h上升时，1天内由于环境温度变化引起的套管内部温度及流动状态的变化，稳态仿真无法体现出温度变化这一过程，而热—流耦合的瞬态仿真要求的时间步长极小，仿真时间过长。针对已建立的三维直流穿墙套管仿真计算调节时间步长，若设置每个时间步长内迭代150次，则仅进行1 h热流耦合瞬态仿真须迭代1.08×10^6次，约花费27天，现实中这样的时间成本是难以接受的。环境温度以1 ℃/h上升在自然环境中是极大的，但对于流体流动而言却是缓慢的。在1 h内由于环境温度上升造成的套管内部流体流速变化极小，在每小时内可将流体流动视为稳态流动，仅计算由于环境温度上升时固体流体传热引起温度分布变化，进行瞬态仿真。在1 h后保持固体温度不变，进行热—流耦合稳态仿真，并将计算结果作为下一时刻温度场运算的流场初始条件进行计算，这种计算方法可极大幅度节省运算成本，且能有效反映环境温度动态变化时穿墙套管内部温度场及流场分布随时间变化的特性，从而实现穿墙套管长时间、大温差的运算，半稳态热—流耦合的计算流程见图2。

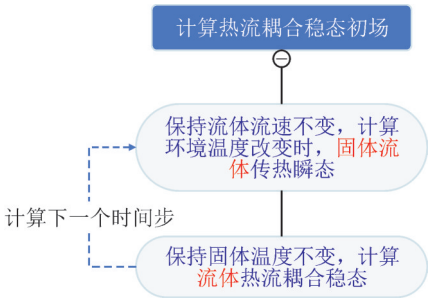


图2　热—流耦合半稳态计算流程

Fig. 2　Thermal-fluid coupling semi-steady state calculation process

1.4　参数设置

穿墙套管与空气直接接触的固体介质外表面会进行对流传热，设置换流系数为20 W/m²·K，中心导杆施加2 500 A直流电流，户内侧温度保持28 ℃，户外侧环境温度初始温度为0 ℃，并以1 ℃/h线性下降30 h，套管的边界条件设置示意图见图3。中心导杆材料为铜，比热容为394 J/(kg·℃)；电容心子材料为环氧树脂浸纸，比热容为1 574 J/(kg·℃)；套管内绝缘介质为SF_6，比热容为665.18 J/(kg·℃)；玻璃钢筒材料为玻璃钢，比热容为1 260 J/(kg·℃)；均压罩及其他金属件材料为铝合金，比热容为900 J/(kg·℃)。

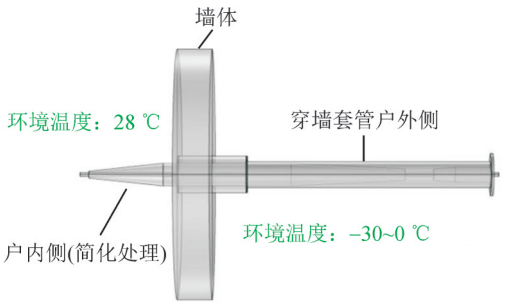


图3　边界条件设置

Fig. 3　Boundary condition settings

2　大温差条件下穿墙套管温度分布特性

2.1　单一环境温度下直流穿墙套管温度分布

2.1.1　环境温度为0 ℃

1)轴向温度分布。设置户外侧环境温度为0 ℃，套管内部的温度轴向分布见图4。穿墙套管内部最高温度出现在进入墙体部分的中心导杆处，温度为68.62 ℃；温度最低处出现在套管下部的玻璃钢筒处，温度约为0.5 ℃，最大温差约为68 ℃。

以图4所示穿墙套管对称轴为截线，截线上温度分布见图5。发热功率不变时，中心导杆处温度从户外侧末端到墙体内部逐渐增加，在进入墙体后

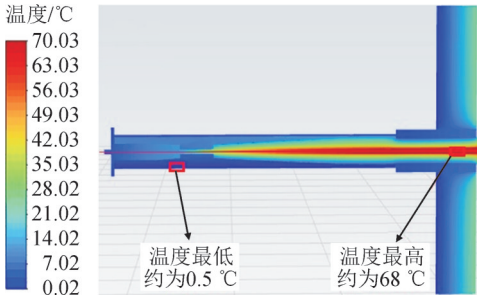


图4　环境温度为0 ℃时，穿墙套管轴向温度分布

Fig. 4　Axial temperature of DC wall bushing when the ambient temperature is 0 ℃

达到最大。由于金属材料的导热率大于非金属材料，穿墙套管户外侧末端与中心导杆相连接的金属件及均压环主要为金属材料，导杆发热后热量通过金属材料与外界直接进行对流换热故温度较低。中心导杆与气体绝缘介质及电容心子接触处，导杆发热需要经由电容心子、气体绝缘介质以及玻璃钢筒再与外界进行对流换热，由于非金属材料导热率低，中心导杆发热无法及时散出，从套管末端到墙体内部沿轴向温度逐渐上升。导杆进入墙体后，中心导杆发热经过电容心子及法兰与墙体进行传热，固—固传热较对流换热效率更低，产生热量无法及时耗散，故穿墙套管进入墙体内部的中心导杆处温度为整个穿墙套管最高温度所在处。同理，与中心导杆直接接触的电容心子也有相同的温度变化规律，故研究由于固体绝缘材料过热导致绝缘劣化应重点研究进入墙体处的部件。

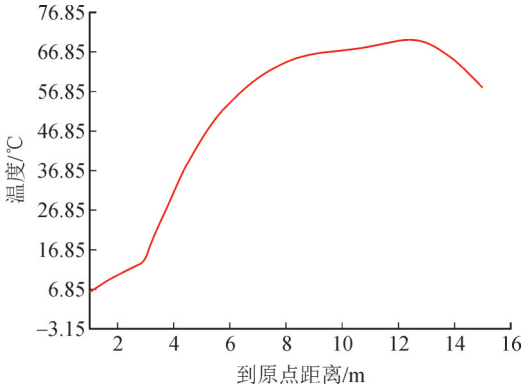


图5　环境温度为0 ℃时，截线上温度分布

Fig. 5　Temperature on the cutoff lines when the ambient temperature is 0 ℃

2)径向温度分布。取图6所示位置的径向截面，截面上温度分布见图7。穿墙套管内部温度沿径向逐渐降低，中心导杆处温度最高而玻璃钢筒外壳处温度最低。由截面1与截面2温度分布可知，由于固体金属材料导热率较大，金属部件的径向温度分布较为均匀。由截面3处温度分布可知，由于固体非金属的导热率较小，固体材料温度沿径向出现明显分层，且温度沿径向降低。对于气体绝缘介质部分，其等温线分布并不是沿径向温度逐渐下降的同心圆，而呈现出上高下低、左右对称的分布规律，且温度的变化在近壁区较为剧烈。由于气体绝缘介质的密度与温度有关，在重力作用下密度大的气体将下沉而密度小的气体将上浮，在穿墙套管内部将产生自然对流现象，使得同一圆周上温度分布并不是均匀的，在环形空间径向的一定范围内离开发热固体表面越远气体的温度反而有升高的现象，这在传热学上称之为等温线的反转。

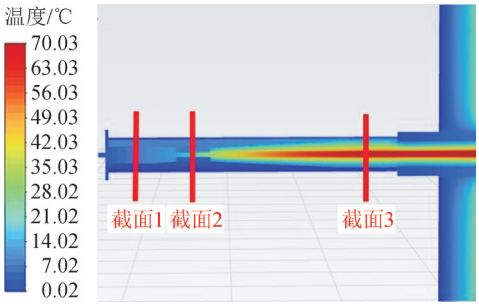


图6　径向截面位置

Fig. 6　Radial sections position

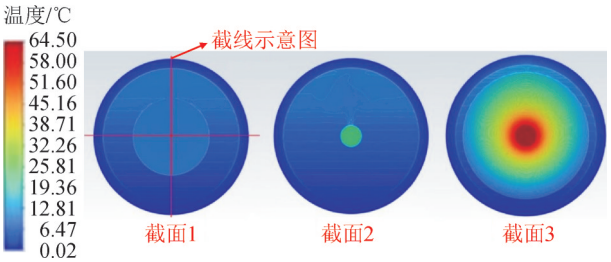


图7　环境温度为0 ℃时，径向截面温度分布

Fig. 7　Temperature on radial cross-sections when the ambient temperature is 0 ℃

截面上流体流速见图8，套管内部流体流速在0~0.2 m/s范围内，流动较为缓慢，后续计算环境温度随时间变化时套管内部流速变化可将一段时间内流速保持不变进行计算。套管的内部金属件、中心导杆以及电容心子的壁面和玻璃钢筒内壁流速较大，SF_6被加热后沿金属件、中心导杆以及电容心子表面上升，流场中的回流将壁面处加热后的SF_6带到套管顶端从而产生了温度回升，温度的最高值出现在内壁面的顶端。加热后的SF_6在顶端汇聚并沿玻璃钢筒内壁从左右两侧向下流动，流动的同时被冷却，流速减小直至到达内壁面底端达到稳定。截面1、截面2处流速最大值大于截面3处，这是由于电容心子表面与玻璃钢筒内壁气隙狭小，流速受空间结构限制而变得缓慢。截面2处气体中心导杆与SF_6直接接触且气体流动空间较大，该处可以明显看到一簇气体受热后上升并在上部内壁面分两侧下降。

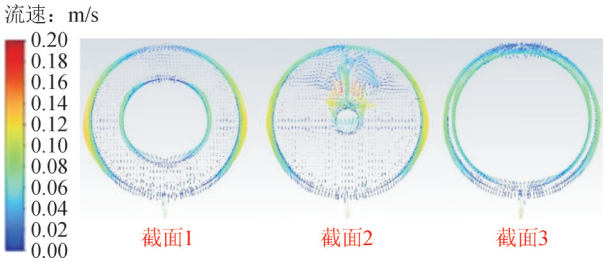
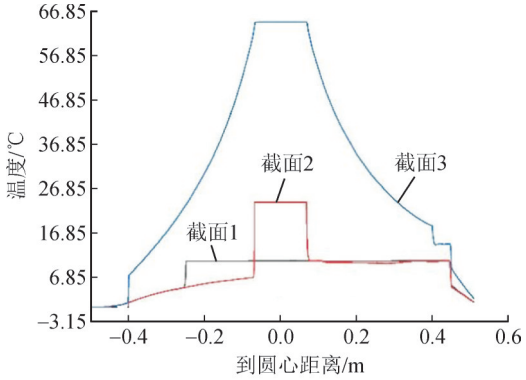


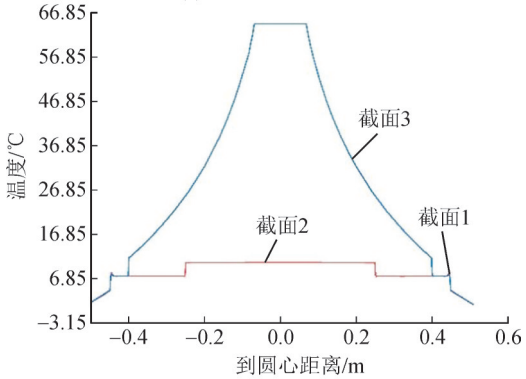
图8　环境温度为0 ℃时，径向截面流速分布

Fig. 8　Velocity on radial sections when the ambient temperature is 0 ℃

在3个截面上分别取横、纵截线，见图7。截线上的温度分布见图9。套管内部流体区域温度呈现出明显的上高下低、左右对称的分布规律。流体区域下部温度低而上部温度高，下部温度随到圆心距离增加而减小，上部温度几乎不随到圆心距离变化而变化，在近壁面处略有上升。3个截面上气体温度最小值几乎相同，出现在内壁面的最低部，且不随截面位置变化而变化。气体温度最大值略有不同，靠近墙壁的截面3的内壁面最顶部温度可达15 ℃，而截面1与截面2上温度最大值仅为10 ℃左右。综上所述，穿墙套管内部径向截面上气体温度最低处为该截面上玻璃钢筒内壁面最底部，而气体温度最高处为该截面上玻璃钢筒内壁面最顶部。



(a) 纵向截线上温度分布图



(b) 横向截线上温度分布图

图9　环境温度为0 ℃时，截线上的温度分布

Fig. 9　Temperature on the cutoff lines when the ambient temperature is 0 ℃

2.1.2　环境温度为−30 ℃

设置环境温度为−30 ℃，其他条件保持不变，其轴向截面处温度分布见图10。穿墙套管内部最高温度出现在进入墙体部分的中心导杆处，温度为61.7 ℃；最低温度出现在套管的下部的玻璃钢筒处，温度约为−29.9 ℃最大温差约为91.6 ℃。保持中心导杆发热功率不变，环境温度降低时，套管内部最低温度与环境温度几乎保持一致，但最高温度降低程度少于环境温度降低，因此套管内部温差变大。

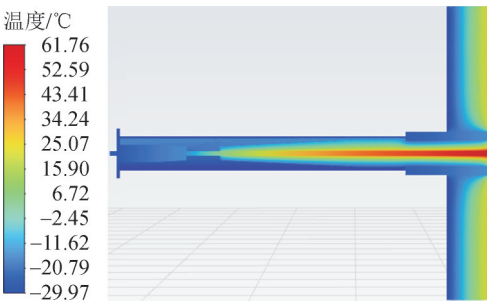
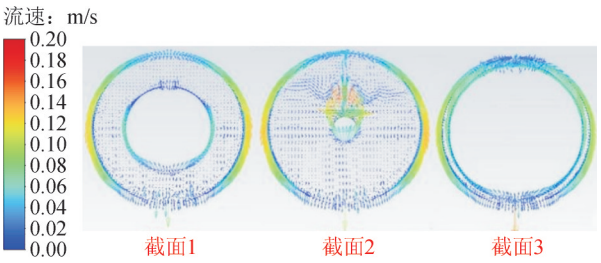


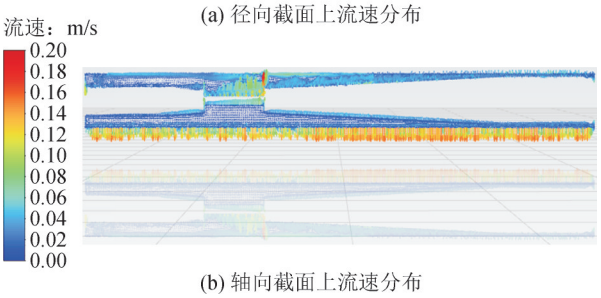
图10　环境温度为−30 ℃时，轴向截面上的温度分布

Fig. 10　Temperature on axial cross-section when the ambient temperature is −30 ℃

穿墙套管内部径向、轴向截面处流速见图11。环境温度为−30 ℃时，套管内部流速与环境温度为0 ℃流速变化不大，由于中心导杆与玻璃钢筒温差变大了，SF_6气体上升与沿壁面下降处流速略有上升，其余部分流速几乎不变。由此可见环境温度发生变化时，套管内部的流速变化很小，温度随时间变化时可将一段时间内流速视为稳态进行计算。



(a) 径向截面上流速分布



(b) 轴向截面上流速分布

图11　环境温度为−30 ℃时，径向、轴向截面上流速分布

Fig. 11　Velocity on radial and axial cross-sections when the ambient temperature is −30 ℃

取上一节中位置相同的截面1、截面2与截面3，分别取图7所示纵向截线，截线上温度分布见图

12。套管内部温度分布规律与环境温度为0 ℃时类似，套管底部温度随到圆心距离增加而减少，套管上部温度随到圆心距离增加而增加，且等温线反转现象随环境温度降低而更加明显，套管内部温度最高处依旧出现在靠近墙体处的玻璃钢筒内壁面顶部。

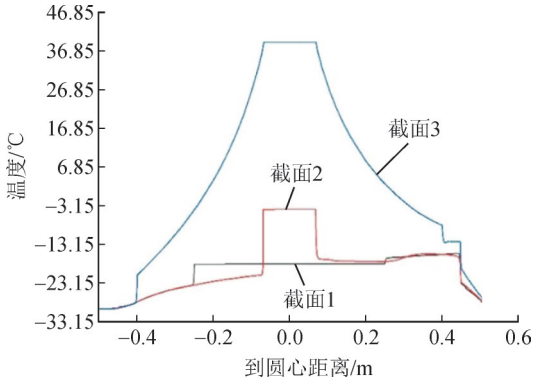


图12　环境温度为−30 ℃时，纵向截线上温度分布

Fig. 12　Temperature on longitudinal cross-sections when the ambient temperature is −30 ℃

2.2　环境温度随时间变化时套管内部温度分布

2.2.1　半稳态仿真计算结果

采样点的径向与轴向分布见图13。从轴向取6个位置，从径向取6个位置，进行组合后获得36个采样点。轴向位置1、2、3为电容心子与玻璃钢间隙处等距的3个点，4、5、6为套管金属件与玻璃钢间隙处等距的3个点。径向截面图中1、2、3、4为到圆心距离相等的4个点，而5、6则为接近电容心子与SF_6气固分界面处的位于气体中的点。径向的截面图中，1、2、3、4是处于气体间隙中间的位置，5和6是气体间隙靠近电容心子处的部分。

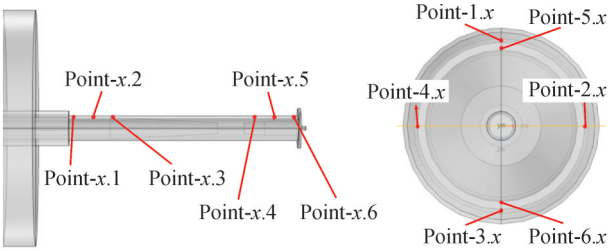


图13　采样点设置示意图

Fig. 13　Schematic diagram of sampling point setting

设置初始环境温度为0 ℃并以1 ℃/h线性下降，其他条件保持不变，采样点处温度随时间变化关系见图14。套管内部不同位置温度随时间变化趋势有所不同而非线性均匀变化，所有采样点均呈现出斜率随时间推移逐渐增大直至与环境温度下降速率保持一致。相同径向截面上，靠下部采样点处温度基本与环境温度保持一致，温度变化速率也更接近环境温度变化速率；靠上的采样点处温度同时受到环境温度与中心导杆加热的影响，温度变化速率较慢。30 h时的环境温度为−30 ℃而气体温度均高于−30 ℃，气体温度变化明显滞后于环境温度变化。采样点中同一时刻温度最高的点为point-5.3，温度最低的点为point-3.4，温度最高的点出现在靠近墙壁但未到末端的套管顶部位置，而非套管末端；随着环境温度降低，套管内部的温差也逐渐增大，以上两点均与上一节中结论一致。point-5.1与point-6.1处温度随时间波动较大，由于流体在末端触壁会产生回流，故该处流动不稳定，温度变化也不稳定。该处温度随时间波动较大且并非温度极值所在位置，无法有效反映套管内部流动状态。如需在套管中安装传感器以检测套管内部温度最大值时，应尽量避免在此进行安装。

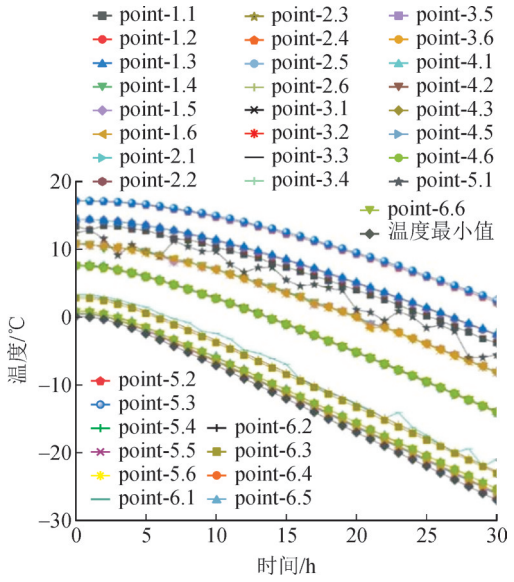


图14　采样点处温度随时间变化关系

Fig. 14　Temperature variation over time at sampling points

电容心子与玻璃钢间隙处SF_6气体上端与下端温度对比，即比较轴向分布中的point-*x*.1，point-*x*.2，point-*x*.3及径向分布中的point-1.*x*，point-3.*x*组合，共6个采样点的温度关系见图15。电容心子侧上下气体温度呈现上大下小的状态，初始时上下温差约为15 ℃，30 h后上下温差约为25 ℃，套管的下部(6点方向)温度较为稳定，3个采样点温度几乎重合的；套管上部(12点方向)3采样点温度存在差异，point-1.3处温度与point-1.2处温度较为接近，均高于point-1.1处温度，这是由于靠近末端的气体与法兰直接接触而造成温度的略微下降。套管下部的气体在环境温度变化时处于一种比较稳定的状态，轴向温度几乎没有差异。相同的环境温度对于上下两部分气体温度作用效果不同，靠近下部的气体会更易被环境温度所影响。

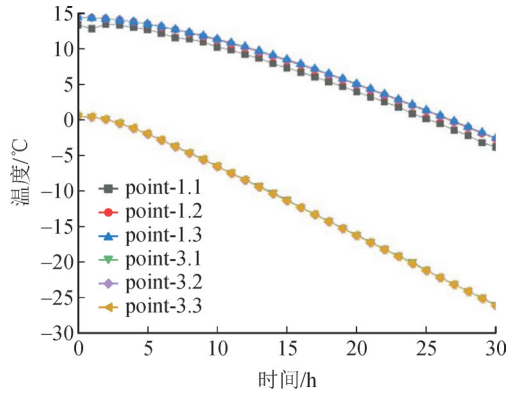


图15　电容心子侧套管上、下部SF_6气体温度随时间变化

Fig. 15　Temperature variation of SF_6 gas on the upper and lower parts of bushing at the capacitor core side over time

电容心子与玻璃钢间隙处间隙中间与气固交界面处SF_6气体温度对比，即比较轴向分布中的point-x.1及径向分布中的point-1.x，point-3.x，point-5.x，point-6.x组合，共4个采样点的温度关系见图16。其中，point-1.1及point-3.1为位于气隙中央的点，而point-5.1及point-6.1为位于气固分界面处的上部和下部的采样点。位于套管上部的point-5.1温度变化受流体流动影响温度波动较为明显，位于套管上部的采样点温度径向分层不明显，而位于套管下部的采样点存在明显的径向分层。

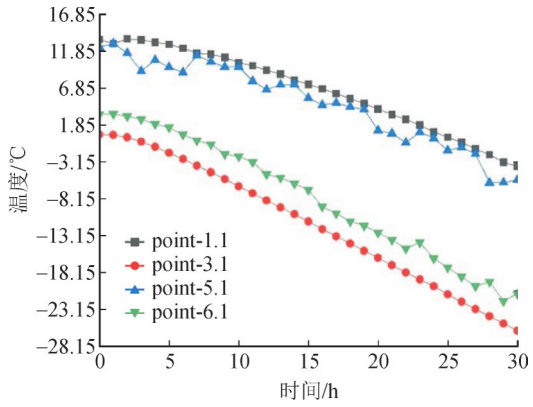


图16　电容心子与玻璃钢筒处SF_6气体温度随时间变化

Fig. 16　Temperature variation of SF_6 gas at the capacitor core and fiberglass cylinder over time

位于金属件与玻璃钢间隙中气体的温度分布见图17，位于套管末端的气体，沿径向和沿轴向基本都不发生分层，它基本上只存在上部与下部的分层，这是由于金属件的位置处金属的导热性好，环境温度很低时金属件的温度基本和环境保持一致，气体流速也非常缓慢，各点处温度也较为接近。

2.2.2　半稳态仿真与稳态仿真计算结果对比

设置初始环境温度为0 ℃并以1 ℃/h线性下降，其他条件保持不变，进行环境温度变化时穿墙套管的半稳态仿真及稳态仿真，得到相同采样点处仿真结果见图18。相同采样点处，稳态仿真与环境温度变化趋势相同，半稳态仿真温度变化滞后于环境变化。由于半稳态仿真更接近于真实的温度变化，降温过程中稳态仿真计算结果较实际温度变化偏低。综上所述，不能采用稳态仿真代替半稳态仿真以模拟套管内部温度的动态变化。温度变化过程中，最恶劣的工况出现在环境温度极值，采用降温过程中环境温度最低时的稳态仿真可以模拟运行过程中遇到的最差工况。

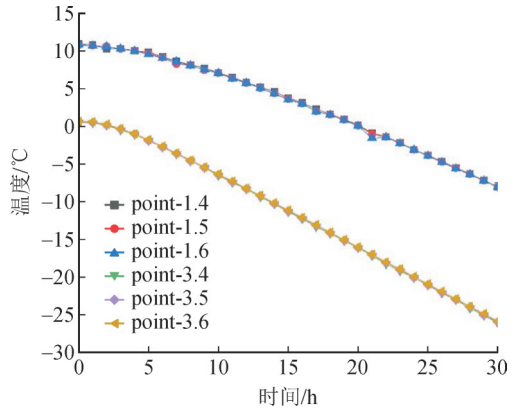


图17　均压罩侧套管上、下部SF_6气体温度随时间变化

Fig. 17　Temperature variation of SF_6 gas at the upper and lower parts of the casing on the voltage grading cover over time

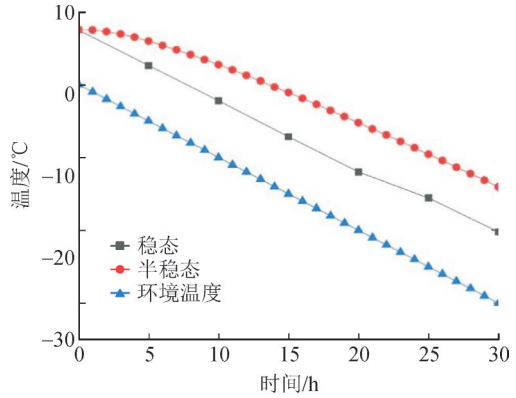


图18　相同位置处半稳态仿真与稳态仿真结果对比

Fig. 18　Comparison of semi-steady state simulation and steady state simulation results at the same position

3　结论

文中以400 kV气体绝缘环氧树脂浸纸电容式套管为研究对象，采用有限元仿真基于半稳态热—流耦合法构建大温差条件下直流穿墙套管温度、流速计算模型，对单一环境温度与环境温度随时间变化条件下套管内部温度分布进行研究，对比了半稳态计算与稳态计算结果的差别，得出以下主要结论：

1)单一环境温度下，环境温度降低时套管内部温度整体温度低，套管内部最低温度与环境温度几乎保持一致，但最高温度降低程度少于环境温度降

低，套管内部温差变大，流速分布变化较小。

2)环境温度随时间变化时，随着环境温度的降低，套管内部不同位置温度随时间变化趋势有所不同而并非线性均匀变化。随时间推移，套管内部各处温度均呈现出斜率逐渐增大直至与环境温度下降速率保持一致。

3)半稳态仿真较稳态仿真更接近于真实的温度变化过程，降温过程中稳态仿真计算结果较实际温度变化偏低，但最恶劣的工况出现在环境温度极值处，采用稳态仿真可模拟运行降温过程中遇到的最差工况。

综上所述，当运行中穿墙套管遭遇极端昼夜温差时，应考虑由于套管内部温差变大引起的SF_6绝缘介质分布不均从而导致的电场畸变，在套管内部安装传感器时应避开温度、流速波动较大的位置以防止传感器无法准确反应套管内部气体状态。由于最恶劣的工况出现在环境温度极值处，大昼夜温差条件下的热—流耦合计算可只对温度极值处采用稳态仿真进行分析。

参考文献：

[1] 孙龙勇，姚灿江，刘英英，等. 新型515 kV直流SF_6气体绝缘穿墙套管研发设计[J]. 高压电器，2023，59(5)：28-34.
Sun Longyong，Yao Canjiang，Liu Yingying，et al. Development and design of new 515 kV DC SF_6 gas insulated wall bushing[J]. High Voltage Apparatus，2023，59(5)：28-34.

[2] 黎 斌，王日新，于 欣，等. 超/特高压直流套管的研发新思路——±800 kV电容式复合绝缘穿墙套管结构设计的探讨[J]. 高压电器，2021，57(7)：1-11.
Li Bin，Wang Rixin，Yu Xin，et al.New idea on the development of EHV/UHVDC bushing-discussion on structure design of ±800 kV capacitive composite insulated wall bushing[J]. High Voltage Apparatus，2021，57(7)：1-11.

[3] 韩晓东，陈晓东，李 杨，等. 电热耦合场分析在±800 kV穿墙套管电场分布计算应用[J]. 高压电器，2023，59(5)：35-42.
Han Xiaodong，Chen Xiaodong，Li Yang，et al. Application of electrothermal coupling field analysis to electric field distribution calculation of ±800 kV wall bushing[J]. High Voltage Apparatus，2023，59(5)：35-42.

[4] 王青于，靳守锋，袁书文，等. 特高压环氧浸纸—SF_6气体复合绝缘穿墙套管界面电荷积累过程和直流电场分布特性仿真[J]. 高电压技术，2022，48(10)：4102-4112.
Wang Qingyu，Jin Shoufeng，Yuan Shuwen，et al. Simulation of interface charge accumulation progress and DC electric field distribution characteristics of the UHV epoxy impregnated paper-SF_6[J]. High Voltage Engineering，2022，48(10)：4102-4112.

[5] 程 显，刘 赛，葛国伟，等. ±400 kV直流穿墙套管用环保气体的绝缘特性[J]. 电工技术学报，2025，40(3)：900-912.
Cheng Xian，Liu Sai，Ge Guowei，et al. Insulation characterization of environmentally friendly gases for ±400 kV DC wall bushing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2025，40(3)：900-912.

[6] 谢雄杰，罗晓庆，胡 伟，等. 不均匀淋雨条件下SF_6绝缘直流穿墙套管直流电压闪络特性[J]. 高电压技术，2021，47(6)：2084-2090.
Xie Xiongjie，Luo Xiaoqing，Hu Wei，et al. DC voltage flashover characteristics of SF_6 insulated DC wall bushing under uneven rain conditions[J]. High Voltage Engineering，2021，47(6)：2084-2090.

[7] 刘 杉，宋胜利，卢理成，等. ±800 kV特高压直流穿墙套管故障分析及设计改进[J]. 高电压技术，2019，45(9)：2928-2935.
Liu Sha，Song Shengli，Lu Licheng，et al. Failure analysis and design improvement of ±800 kV UHVDC wall bushings[J]. High Voltage Engineering，2019，45(9)：2928-2935.

[8] 王 彤. 特高压直流穿墙套管外绝缘研究及结构优化设计[D]. 武汉：武汉大学，2017.
Wang Tong. Research of external insulation and optimal design of structure for UHV DC wall bushing[D]. Wuhan：Wuhan University，2017.

[9] 孙昭英，宿志一. 解决高压直流穿墙套管非均匀淋雨闪络的措施和途径[J]. 中国电力，1994(4)：36-39.
Sun Zhaoying，Su Zhiyi. The measures and ways to solve the non-uniform rain flashover of HVDC wall bushing[J]. Electric Power，1994(4)：36-39.

[10] 孙昭英，来小康，陈 行，等. 高压直流穿墙套管非均匀淋雨闪络及其防护措施[J]. 电网技术，1993(3)：22-27.
Sun Zhaoying，Lai Xiaokang，Chen Hang，et al. Investigation of HVDC wall bushing flashover in nonuniform rain and preventive maintenance[J]. Power System Technology，1993(3)：22-27.

[11] 邱文严，陈军锋，周文正. 复杂天气下直流穿墙套管电场分布仿真研究[J]. 绝缘材料，2023，56(9)：49-53.
Qiu Wenyan，Chen Junfeng，Zhou Wenzheng. Simulation on electric field distribution of DC wall bushing under complex weather conditions[J]. Insulating Materials，2023，56(9)：49-53.

[12] 楚智霖，王青于，刘则希，等. 高压套管三维热—流耦合场数值计算方法与验证[J]. 电工技术学报，2026，41(15)：5237-5248.
Chu Zhilin，Wang Qingyu，Liu Zexi，et al. Numerical calculation method and verification of three - dimensional thermal - fluid coupling field for high-voltage bushings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2026，41(15)：5237-5248.

[13] 王仲奕，童军心，赵彦珍. 高压交直流电容式套管内部电场的分析比较及改进[J]. 高压电器，2003，39(3)：9-11.
Wang Zhongyi，Tong Junxin，Zhao Yanzhen. Comparison，analysis and improvement of the electric field distribution in high voltage AC and DC capacitive bushings[J]. High Voltage Apparatus，2003，39(3)：9-11.

[14] 张启浩，吴德贯，马正霖. ±800 kV特高压直流输电工程直流穿墙套管设计缺陷及其改进方法[J]. 高压电器，2019，55(4)：239-244.
Zhang Qihao，Wu Deguan，Ma Zhenglin. Defect and improved method of DC wall bushing design in ±800 kV UHVDC transmission project[J]. High Voltage Apparatus，2019，55(4)：239-244.

[15] 张晋寅，韦晓星，夏谷林，等. 南方电网直流穿墙套管运行特性分析[J]. 电瓷避雷器，2019(4)：230-236.

Zhang Jinyin, Wei Xiaoxing, Xia Gulin, et al. Operating characteristic analysis of DC wall bushings in CSG[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(4): 230-236.

[16] 张施令，彭宗仁，刘　鹏，等. 电热耦合模型应用于干式油气套管径向温度分布计算及其试验研究[J]. 电网技术，2012，36(12)：289-296.
Zhang Shiling, Peng Zongren, Liu Peng, et al. Experimental study on electro-thermal coupling model applied in computation of radial temperature distribution of RIP oil - gas bushing condenser[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 289-296.

[17] 王青于，杨　熙，彭宗仁，等. 应用三维电磁—热—流耦合场分析法计算换流变压器干式套管的温度场分布[J]. 中国电机工程学报，2016，36(22)：6269-6275.
Wang Qingyu, Yang Xi, Peng Zongren, et al. 3D coupled electromagnetic - thermal - fluid method for computation of temperature field of converter transformer RIP bushings[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6269-6275.

[18] 汤　浩，李金忠，张贺军，等. 特高压直流换流变压器阀侧套管高环温强电流下轴径向的温度分布规律[J]. 中国电机工程学报，2017，37(18)：5494-5503.
Tang Hao, Li Jinzhong, Zhang Hejun, et al. Axial and radial temperature distribution of the valve side bushing in UHVDC converter transformer under high ambient temperature and large current[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5494-5503.

[19] Yang Xiao, Yang Zhuodong, Zhang Yi, et al. Simulation analysis of electrical - thermal - fluid coupling property for supporting insulation in SF_6 filled HVDC apparatus[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(1): 69-76.

[20] Jyothi N S, Ramu T S. Statistical methods for accelerated life testing with particular reference to resin impregnated paper bushings[C]//2012 Asia - Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2012: 1-4.

[21] Zhang Shibao. Evaluation of thermal transient and overload capability of high - voltage bushings with ATP[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1295-1301.

[22] 温　苗，林　莘，仲思蒙. 变压器套管传热性能的数值模拟和试验验证[J]. 高电压技术，2016，42(9)：2956-2961.
Wen Miao, Lin Xin, Zhong Simeng. Numerical simulation and experimental study of heat transfer characteristics in transformer bushing[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2956-2961.

[23] 邓　江. 干式SF_6气体绝缘特高压直流套管的电热场分布特性及内绝缘结构优化设计研究[D]. 成都：西南交通大学，2020.
Deng Jiang. Study on electric temperature field distribution characteristics and optimal design of internal insulation structure in dry - type SF_6 gas insulated UHVDC bushing[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.

[24] 许佐明，胡　伟，张施令，等. 550 kV环氧浸渍干式油—SF_6电容套管温度场分析[J]. 高电压技术，2012，38(11)：3087-3092.
Xu Zuoming, Hu Wei, Zhang Shiling, et al. Thermal field analysis for 550 kV epoxy resin - impregnated paper oil - SF_6 capacitor bushing[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3087-3092.

[25] 汪书苹，从　伟，周　勇，等. 变压器油老化对变压器套管温度场的影响[J]. 变压器，2022，59(3)：18-22.
Wang Shuping, Cong Wei, Zhou Yong, et al. Effect of aging of transformer oil on temperature field of transformer bushing[J]. Transformer, 2022, 59(3): 18-22.

李艳鹏(1982—)，男，硕士，正高级工程师，主要研究方向为高压试验和带电检测技术(E-mail：liyanpeng1982@163.com)

李军浩(1980—)，男，博士，长期从事高电压现场试验和状态感知技术的研究和教学(通信作者)(E-mail：junhaoli@xjtu.edu.cn)。