

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.04.023

极端高温下 10 kV 电缆中间接头载流量分析

卢斌先¹, 薛涛¹, 王宜静², 孙欣宇¹, 吴铮³, 焦重庆¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 100096; 2. 黑龙江省人民政府投资项目建设管理中心, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510410)

摘要:随着世界各地夏季环境温度不断升高, 电缆中间接头的工作环境正在恶化。为此, 文中基于有限元法建立 10 kV 三芯电缆及其中间接头仿真模型, 分析不同环境温度和不同电流下中间接头的温度分布。首先, 开展温升试验, 得到电缆中间接头表面的稳态温度, 验证仿真模型的准确性; 然后, 拟合不同环境温度下中间接头高压载流导体表面温度与电流的函数关系, 以此可以计算不同极端环境温度下中间接头的极限安全载流量。结果表明, 环境温度升高对中间接头高压载流导体表面的温度分布趋势几乎没有影响, 在外护套外表面处也满足此规律。中间接头高压载流导体表面温度与电流近似成二次函数关系。当电流幅值为 480 A、环境温度为 75 °C 时, 高压载流导体表面与外护套外表面最高温度分别是环境温度为 30 °C 时的 1.57 倍与 1.69 倍。当环境温度超过 55 °C 时, 按照国标规定的持续允许载流量会使中间接头高压铜导体表面温度超过最高允许运行温度 90 °C。考虑到自 2020 年起夏季环境温度持续增加, 现行国标中 10 kV 铜导体三芯交联聚乙烯绝缘电缆中间接头的持续允许载流量须被修正。

关键词:三芯电缆; 中间接头; 电缆沟; 极端环境温度; 有限元法; 载流量

中图分类号: TM247+.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)04-0215-08

0 引言

目前, 城市电力发展越来越快, 电力电缆与电缆中间接头使用量日益增加^[1-3]。中间接头的结构相比于电力电缆更加复杂, 也更容易发生事故。据统计, 70% 的电力电缆事故是由电缆中间接头故障造成的^[4-6]。在国内, 电缆附件故障频繁发生^[7-11]。极端高温环境可能进一步增加电缆中间接头故障的风险。2022 年夏季, 国内某些地区的环境温度超过 55 °C, 但目前国家标准 GB 50217—2018 中仅明确给出了 35 °C 及以下环境温度下铺设于土壤中的电缆的载流量校正系数。极端高温已经严重威胁到人类的正常生活^[12]。在这种极端高温环境下, 如果电缆高压载流导体温度超过 GB 50217—2018 中规定的以交联聚乙烯为绝缘的电缆铜导体的最高温度 90 °C, 电缆中间接头内部绝缘材料会加速老化, 从而发生故障^[13-15]。

目前, 国内外学者们对中间接头的内部温度已进行大量研究。文献[16]通过实验发现当温度在 100 °C 左右时, 硅胶具有明显的热破坏特征, 且随着温度增加, 硅胶的电树形态呈丛状电树的趋势。文献[17]研究了在不同温度下退役高压电缆的绝缘介电特性。但上述文献仅从实验的角度研究内部温度过高对中间接头的影响, 并未通过仿真具体分

析中间接头内部温度分布情况。文献[18]通过研究发现由电缆段确定的载流量会使中间接头高压载流导体的温度比最大长期允许温度值高, 不利于电缆长期稳定运行。文献[19]通过仿真得到了正常运行、电缆芯短路和接头中存在间隙和水滴时接头外表面的温度分布。文献[20]建立了城市配电网中常见的 10 kV 交流三芯电缆接头的三维仿真模型, 采用热-电耦合模块对接触系数为 4 的接头模型进行温度场仿真研究。文献[21]计算了隧道内敷设的超高压电力电缆载流量。但上述文献仅在正常环境温度下进行仿真分析, 并未研究极端高温环境下的中间接头内部温度分布。文献[22]对退役 110 kV 电缆附件绝缘的热学性能和陷阱分布特性进行了测试和分析, 但对环境温度的研究仍在正常范围内, 并未达到极端高温环境温度。

2021 年—2022 年, 某些地区夏季气温已经远超国标所考虑的环境温度范围。为此, 文中基于有限元法, 建立 10 kV 三芯电缆及其中间接头仿真模型, 并分析在不同极端高温环境和不同电流下铺设于电缆沟中的电缆中间接头的内部温度分布。文中研究可为考虑极端高温环境的 10 kV 铜导体三芯交联聚乙烯绝缘电缆中间接头的持续允许载流量的标准制定提供指导。

1 10 kV 电缆中间接头仿真模型

1.1 仿真模型及材料参数

目前, 10 kV 电缆大多为电缆沟铺设。基于此,

收稿日期: 2023-01-31; 修回日期: 2023-04-03

基金项目: 国家重点研发计划资助项目“柔性直流海上换流平台轻型化关键技术研究”(2021YFB2400602)

文中建立三维仿真模型。该模型分为四部分,第一部分为 10 kV 三芯电缆中接头,是文中主要的研究对象;第二部分为与中接头相连的三芯电缆,考虑轴向传热对中接头温度分布的影响,在中接头模型两端各加 3.75 m 长的电缆,用以分析电缆对中接头的轴向传热;第三部分为电缆沟,根据相关标准在模型中设置电缆沟的宽度和深度均为 4 m,长度与电缆首末两端的距离等长,为 8 m;第四部分为外界土壤,土壤长度与电缆沟保持一致,左右边界和下边界应设置为距离电缆沟 20 m^[23]。10 kV 电缆中接头的结构如图 1 所示,其从外到内分别由高压载流导体、屏蔽层、电缆绝缘、绝缘屏蔽、铜网层和电缆外护套层构成。为方便表示,在图 1 中定义 z 为中接头的轴向方向。当 $|z| \leq 250$ mm 时,为中接头区域,当 $|z| > 250$ mm 时,为电缆区域。

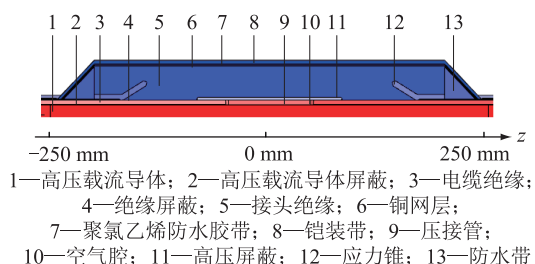


图 1 10 kV 电缆中接头沿轴向截面模型示意

Fig.1 Schematic diagram of the cross-section along the axial direction of the joint of the 10 kV cable

为清晰地展示中接头的结构,仿真中隐藏了填充层和外护套结构,电缆及其中间接头的仿真模型如图 2 所示。文中认为压接管与高压载流导体良好接触,不考虑接触电阻的影响;压接管与电缆绝缘良好接触,不存在环形气隙;忽略电缆沟中搭接电缆的支架模型,模型各结构的材料参数如表 1 所示^[24-26]。



图 2 三芯电缆及其中间接头模型示意

Fig.2 Schematic diagram of three-core cables and joints

1.2 边界条件与控制方程

电磁场和温度仿真模型的边界条件分别如图 3(a)和图 3(b)所示。图 3(a)中, Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 为电缆首末两端的边界; Γ_4 为与空气接触的电缆; Γ_5 、 Γ_6 为中接头最外层的边界。图 3(b)中,黄色、红色和白色区域分别为土壤、电缆沟和空气区域,电缆及其中间接头铺设于白色的空气区域正中心。其中

表 1 10 kV 电缆中接头材料参数

Table 1 The material parameters of the 10 kV cable joint

接头部位	相对介电常数	电导率/($S \cdot m^{-1}$)	相对磁导率	导热系数/[$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$]	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	恒压热容/[$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$]
高压载流导体	1	5.8×10^7	1	401	8 890	386
压接管	1	3.5×10^7	1	401	8 890	386
电缆绝缘	2.5	10^{-13}	1	0.40	1 400	2 200
接头绝缘	2.7	4.4×10^{-15}	1	0.286	1 200	1 200
半导体层	10	10	1	1.00	1 200	2 000
防水带	3	10^{-14}	1	0.16	1 380	800
屏蔽层	10	10	1	0.38	1 340	1 480
铠装带	10	2.0×10^{-15}	300	0.50	2 400	670
填充层	1	10^{-20}	1	0.24	580	0.82
外护套	2	10^{-13}	1	0.40	980	2 310
应力锥	20	0.1	1	0.25	2 250	2 200
电缆沟				1.00	2 000	970
土壤				1.25	2 600	6 500
空气				0.26	1.21	1.00

Γ_7 、 Γ_8 分别为三维空间中土壤区域的前后边界; Γ_9 、 Γ_{10} 分别为左右边界; Γ_{11} 为深层土壤边界; Γ_{12} 为地表边界。

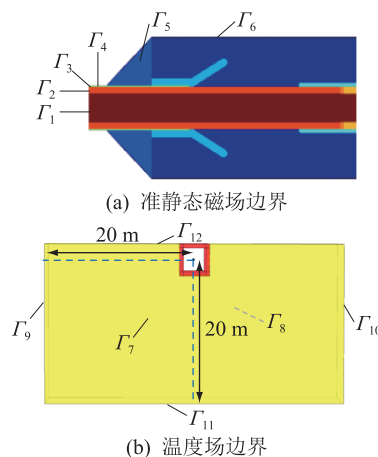


图 3 10 kV 电缆及其中间接头仿真模型边界

Fig.3 Boundaries of the simulation model of the 10 kV cable and joint

当电缆足够长时,认为电缆端部 Γ_7 和 Γ_8 为绝热边界条件,而距离电缆超过 20 m 远的土壤层也可设置为绝热边界条件,因此设置土壤的前后边界 (Γ_7 和 Γ_8) 和左右边界 (Γ_9 和 Γ_{10}) 为第二类齐次边界条件,其中边界法向热通量密度为 0;距离足够深的深层土壤不受电缆温度影响,因此设置 Γ_{11} 为第

一类边界条件,温度为 25 °C;设置地表边界 Γ_{12} 为和空气产生对流换热的第三类边界条件^[27]。准静态磁场和温度场的边界条件分别如式(1)和式(2)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{n} \times \mathbf{A} |_{\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_6} = 0 \\ \mathbf{J} |_{\Gamma_1} = I_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} |_{\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_7, \Gamma_8, \Gamma_9, \Gamma_{10}} = 0 \\ T |_{\Gamma_{11}} = 25 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} |_{\Gamma_{12}} = h(T - T_f) |_{\Gamma_{12}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{n} 为边界外法线方向; \mathbf{A} 为磁矢位; I 为高压载流导体处的电流; \mathbf{q} 为热通量; I_0 为外加电流; T_f 为环境温度; T 为温度; h 为对流换热系数。

在仿真计算中,图 3(a)电磁场部分的控制方程如式(3)一式(5)所示。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (5)$$

式中: \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{B} 为磁感应强度; ω 为角频率; \mathbf{H} 为磁场强度; \mathbf{J} 为电流密度; μ_0 为真空磁导率。

图 3(b)温度场仿真的稳态传热方程如式(6)和式(7)所示。

$$\nabla \cdot \mathbf{q} + Q_e = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (7)$$

式中: Q_e 为电磁热源; k 为导热系数。

电缆中间接头在运行阶段的热源由三部分构成:高压载流导体中的焦耳热产生的损耗、金属中的感应发热产生的损耗和绝缘层中的介质损耗。其中,高压载流导体的焦耳热与金属中的感应发热所产生的损耗可用电磁场中计算所得的电磁损耗表示;而绝缘层的介质损耗特别小,可以忽略不计。在仿真模型中设置电缆高压载流导体通过幅值为 I_0 的对称三相电流。

设置对流换热系数 h 为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[24]。当环境温度大于 $45 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时可认为处于极端高温环境,文中设定环境温度分别为 $45, 55, 65, 75 \text{ } ^\circ\text{C}$,在这 4 种情况下研究中间接头内部温度变化情况。设定中间接头高压载流导体所通电流的频率为 50 Hz 。此次仿真模型中铜高压载流导体的横截面积为 400 mm^2 ,根据 GB 50217—2018 中以 10 kV 交联聚乙烯为绝缘的三芯电缆铜高压载流导体横截面积为 400 mm^2 的持续允许载流量为 480 A 的规定,考虑到用电高峰期电缆及其中间接头可能会过负荷运行,设定高压载流导体所通电流幅值 I_0 分别为 $300, 400, 500, 600, 700 \text{ A}$ 。

2 仿真模型准确性验证

考虑到三芯电缆温度分布的测量比较困难,文中通过对比单芯中间接头温度仿真结果和试验结果,验证图 1 所示仿真模型。其中,准静态磁场的边界条件如式(1)所示,而温度场的边界条件修改为:

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} |_{\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3} = 0 \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} |_{\Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_6} = h(T - T_f) |_{\Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_6} \end{cases} \quad (8)$$

设置高压载流导体所通电流为频率 50 Hz 、幅值 600 A 的交流电流。同时建立电缆中间接头热扩散特性试验平台,如图 4 所示,试验平台中红外测温仪的测温范围为 $-20 \sim 350 \text{ } ^\circ\text{C}$,测温精度为 $\pm 1\%$ 。

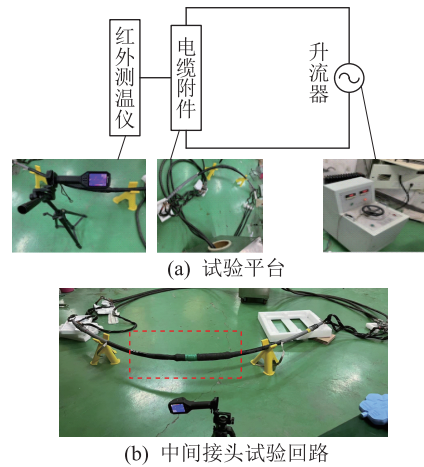


图 4 电缆中间接头测温试验

Fig.4 Temperature measurement test of cable joint

在中间接头表面处设置 A, B, C 3 个测温点。其中试验测温点分别为 A_1, B_1 和 C_1 ,仿真测温点分别为 A_2, B_2 和 C_2 ,试验测温点和仿真测温点一一对应。依据试验测温点的稳态温度数据提取相对应的仿真测温点 A_2, B_2 和 C_2 的稳态温度数据,具体位置分别如图 5(a)和图 5(b)所示。设置测温点的初始温度均为 $30 \text{ } ^\circ\text{C}$,环境温度为 $30 \text{ } ^\circ\text{C}$,对流换热系数 h 仍为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

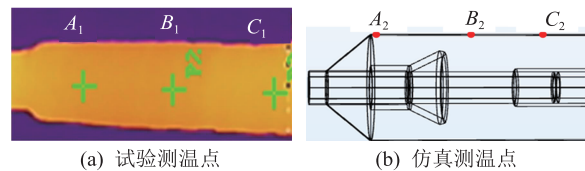


图 5 测温点示意

Fig.5 Schematic diagram of temperature measuring points

试验中,从第 14 个小时开始试验品表面 A_1, B_1, C_1 点的温度停止上升,到第 21 个小时仍保持不变,则认为从第 14 个小时开始中间接头温度达到稳

态,稳态时测温点温度如表 2 所示。表 2 同时给出了稳态时仿真测温点的温度数据。

表 2 稳态时仿真结果与试验结果对比
Table 2 Comparison between simulation results and test results in steady state

测温点	稳态温度/℃
A_1	40.94
试验 B_1	41.88
C_1	41.71
A_2	41.62
仿真 B_2	41.74
C_2	42.01

误差的计算公式如式(9)所示。

$$\delta_\varepsilon = \left| \frac{T_{\varepsilon_1} - T_{\varepsilon_2}}{T_{\varepsilon_2}} \right| \times 100\% \quad (9)$$

式中: δ_ε 为误差绝对值, ε 取 A、B、C, 分别表示 3 个测温点仿真数据与试验数据的误差绝对值; T_{ε_1} 为试验中 3 个测温点的稳态温度; T_{ε_2} 为仿真中 3 个测温点的稳态温度。

根据计算得到 $\delta_A = 1.63\%$, $\delta_B = 0.34\%$, $\delta_C = 0.71\%$ 。将稳态温度仿真结果与试验结果进行对比,可知相对误差较小,从而验证了所建中间接头数值仿真模型的准确性。

3 结果分析

3.1 极端高温环境下电缆及其中间接头温度分布

当环境温度 T_f 设置为 45℃, 高压载流导体电流幅值 I_0 为 480 A 时,中间接头在稳态温度下的温度分布如图 6 所示。

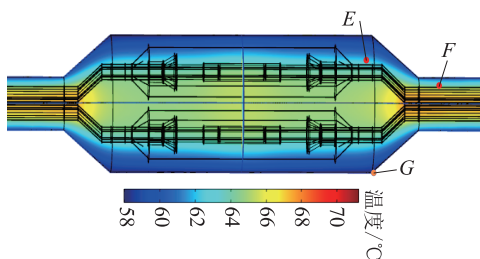


图 6 中间接头温度分布

Fig.6 The temperature distribution in the joint

图 6 中, E 点为高压载流导体温度最高点, 同时也是整体温度最高点 ($z = 250$ mm), E 点温度为 83.54℃; F 点为高压载流导体温度最低点 ($z = 750$ mm), F 点温度为 65.01℃; G 点为整体温度最低点 ($z = 253$ mm), G 点温度为 61.22℃。根据仿真分析结果可知, 温度最高点位于电缆高压载流导体处, 最高可达 83.54℃, 温度最低点位于电缆中间接头

的外护套外表面, 最低为 61.22℃。电缆和中间接头的高压载流导体表面温度如图 7 所示, 由于温度分布具有对称性, 文中选取其中一根电缆芯进行分析并展示出了 $z = 0$ mm 到 $z = 4000$ mm 的温度情况。

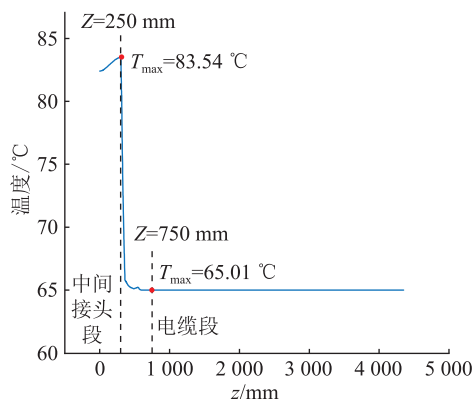


图 7 高压载流导体表面温度分布
($T_f = 45$ ℃, $I_0 = 480$ A)

Fig.7 The temperature distribution on the surface of the current carrying conductor
($T_f = 45$ ℃, $I_0 = 480$ A)

图 7 中, 中间接头段位于 $z = 0$ mm 到 $z = 250$ mm 区域; 其余区域为电缆段。高压载流导体的温度最高点和温度最低点在图 6 中已经标出, 即 E 点和 F 点。由图 7 可知, 最高温度在 $z = 250$ mm 附近, 约为 83.54℃; 最低温度在 $z = 750$ mm 附近, 约为 65.01℃。中间接头段与电缆段的高压载流导体的最大温差可达 18.53℃。整体来看, 中间接头段处高压载流导体的温度高于电缆段处的温度, 因此当中间接头处高压载流导体的温度满足国标要求时, 电缆段也满足要求。后续研究将以中间接头处高压载流导体温度为重点进行分析。当 $z > 750$ mm 时温度几乎不再变化, 因此可认为此时电缆末端不再有轴向传热, 且文中仿真模型电缆长度足够长, 设置合理。

图 8 为整体模型中从某一单芯中间接头的中间位置沿 z 轴剖开的截面, 包含了填充层和外护套外表面区域。取图 8 中外护套外表面计算路径与高压载流导体表面计算路径来计算中间接头轴向不同位置的温度分布, 其中红色截线为计算路径, 其计算结果如图 9 所示。

由图 9 可知, 高压载流导体总体温度从两端到中间呈现下降趋势, 最大温差约为 0.82℃, 温度较低的区域在 -50~50 mm 区域内。该区域为压接管所在区域, 因为压接管与高压载流导体良好接触, 此处导体的横截面积相当于增大了, 高压载流导体距离外护套外表面更近, 电磁热能更快传递到外护套外表面, 从而散发到空气中, 故高压载流导体温

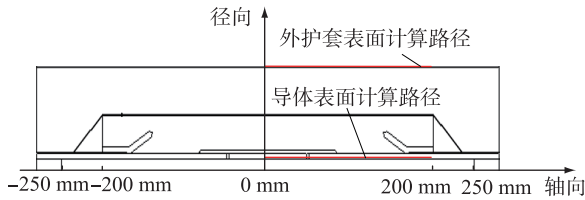
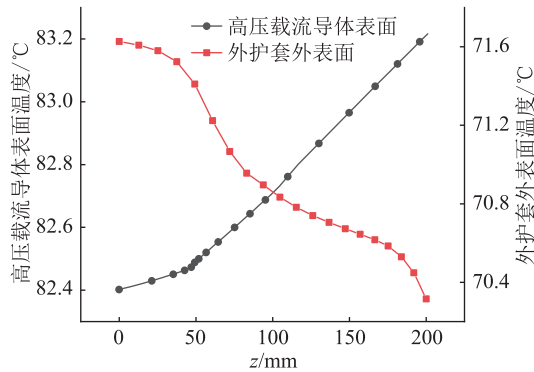


图8 中间接头温度计算路径示意

Fig.8 Schematic diagram of the temperature calculation path in the joint

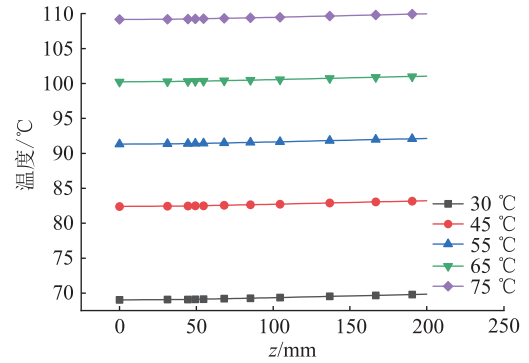
图9 外护套外表面与高压载流导体表面轴向不同位置温度分布对比 ($T_i=45\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $I_0=480\text{ A}$)Fig.9 The comparison of temperature distribution along the axial direction on the surfaces of the outer sheath and high voltage current carrying conductor ($T_i=45\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $I_0=480\text{ A}$)

度在此处最低。外护套外表面温度的变化趋势为从两端到中间温度增大,最大温差约为 $1.22\text{ }^\circ\text{C}$ 。该变化趋势与高压载流导体表面轴向不同位置温度变化趋势刚好相反,这是因为压接管区域处电磁热更快传递到了外护套外表面,因此与压接管对应的外护套外表面区域温度最高。

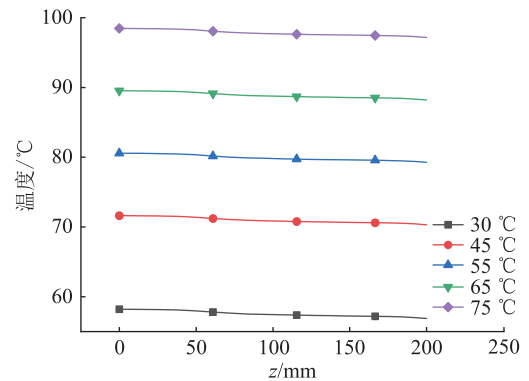
3.2 不同极端高温环境下中间接头内部温度变化

取图8中的外护套外表面计算路径和导体表面计算路径计算其温度分布情况。为更好地对比,此次仿真分析加入了正常夏季的环境温度,即环境温度为 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 的情况。不同环境温度下高压载流导体表面温度分布和外护套外表面温度分布如图10所示。

由图10可知,5种不同环境温度下中间接头的高压载流导体表面温度与外护套外表面温度的变化趋势大致相同。外护套外表面与高压载流导体表面的最大温差与环境温度无关,前者固定为 $1.3\text{ }^\circ\text{C}$,后者固定为 $0.86\text{ }^\circ\text{C}$ 。在通过幅值为 480 A 的电流的情况下,当环境温度达到 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 时,高压载流导体表面最高温度是环境温度为 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 的 1.57 倍,外护套外表面最高温度是环境温度为 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 的 1.69 倍。此外,当环境温度达到 $55\text{ }^\circ\text{C}$ 时,在所通电流幅



(a) 高压载流导体表面温度分布



(b) 外护套外表面温度分布

图10 不同环境温度下中间接头温度分布对比 ($I_0=480\text{ A}$)Fig.10 The comparison of temperature distribution at different ambient temperatures ($I_0=480\text{ A}$)

值为 480 A 的情况下,高压载流导体表面温度已经超过了 GB 50217—2018 所规定的最高温度 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 。在极端环境下中间接头内部温度过高会对其安全稳定运行造成严重危害。

3.3 极端高温环境下电流对中间接头温度分布影响

为探究中间接头在最恶劣工作环境下的内部温度分布情况,同时考虑到世界某些国家环境温度高达 $73\text{ }^\circ\text{C}$,文中设置极端温度为 $75\text{ }^\circ\text{C}$,在不同电流幅值下高压载流导体表面最高温度的仿真结果如图11所示。图11中,红色虚线为 GB 50217—2018 中规定的以交联聚乙烯为绝缘的三芯电缆铜高压载流导体的最高允许温度 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 。

由图11可知,高压载流导体表面温度与所通电流幅值的关系近似二次函数。根据式(10)对所有不同环境温度下的最高温度与所通电流幅值关系进行拟合。

$$T_{\max} = aI_0^2 + bI_0 + c \quad (10)$$

式中: a 、 b 、 c 为常数; T_{\max} 为最高温度。得到的高压载流导体上电流的拟合曲线参数如表3所示。定义 I_{\max} 为极限安全载流量,以表示在高压载流导体温度为 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 时所通过的电流幅值大小,即图11中红色虚线与各曲线交点对应的横坐标电流幅值。

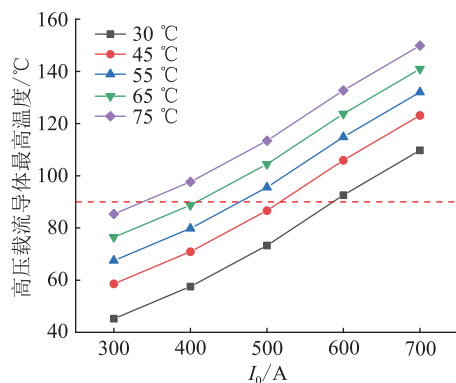


图 11 不同环境温度下高压载流导体最高温度与所通电流幅值关系

Fig.11 The relationship between the highest temperature of high voltage current carrying conductor and the current amplitude under different ambient temperatures

表 3 曲线拟合参数

环境温度/°C	$a/10^{-5}$	b	c	I_{max}/A
30	9.524	0.069	15.536	593.3
45	9.541	0.069	28.941	517.0
55	9.574	0.068	37.948	464.3
65	9.566	0.068	46.835	405.3
75	9.554	0.068	55.752	341.1

根据表 3 和式 (10) 可以得到不同环境温度时高压载流导体在不同电流幅值下的温度。

GB 50217—2018 中规定, 10 kV 电缆铜高压载流导体横截面积为 400 mm² 的电缆的最大额定载流量为 480 A。2022 年, 国内外许多地方的环境温度已经突破 55 °C。在该情况下, 464.3 A 的电流就使得导体最高温度达到了 90 °C, 如表 3 所示。如果考虑到一定裕度, 额定电流应该还远低于 464.3 A, 而不是国标规定的 480 A, 因此按照国标规定的允许载流量在极端环境温度下运行有可能造成中间接头段处的高压载流导体过热损坏。

4 结论

文中采用有限元法分析了极端环境温度下电缆沟铺设的 10 kV 三芯电缆中间接头内部温度分布。研究结论如下:

(1) 中间接头的高压载流导体表面与外护套外表面的温度分布趋势相反。高压载流导体表面温度从中间向两端升高, 外护套外表面温度从中间向两端降低。

(2) 环境温度的升高对中间接头高压载流导体表面的温度分布几乎没有影响, 在外护套外表面处

也满足此规律。电流增大的倍数对中间接头高压载流导体表面温度的影响近似为二次函数关系。

(3) 文中拟合了不同极端环境温度下外护套外表面和高压载流导体表面最高点温度随所通电流幅值变化的函数关系, 计算得到各环境温度下的极限安全载流量。

(4) 考虑近些年夏季环境温度持续明显增加, 现行国标中 10 kV 铜导体三芯交联聚乙烯绝缘电缆中间接头的持续允许载流量须被修正。

参考文献:

[1] 邢洁, 曹瑞琳. 城市配电网中电缆大规模接入条件下的无功优化方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(1): 32-38.
XING Jie, CAO Ruilin. Study on reactive power optimization method with large scale access condition of cables in urban distribution network[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1): 32-38.

[2] 陶瑞祥, 王成珠, 姜云土, 等. 220 kV 电缆中间接头 XLPE 绝缘收缩电场分析[J]. 浙江电力, 2021, 40(11): 23-28.
TAO Ruixiang, WANG Chengzhu, JIANG Yuntu, et al. Analysis on electric field of stress cone with XLPE insulation shrinkage of 220 kV cable intermediate joints[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(11): 23-28.

[3] 徐明忠, 夏荣, 欧阳本红, 等. 基于内置差分电容的电缆接头局放检测技术研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 37-44.
XU Mingzhong, XIA Rong, OUYANG Benhong, et al. Cable joint partial discharge detection based on built-in differential capacitance[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 37-44.

[4] 陶宇航, 张熹, 宫祥龙. 10 kV 电缆故障测距及定位典型案例的分析[J]. 电气技术, 2022, 23(2): 88-93.
TAO Yuhang, ZHANG Xi, GONG Xianglong. Typical cases analysis of 10 kV cable fault location[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(2): 88-93.

[5] 揭青松, 杨庆, 崔浩楠, 等. 基于暂态电压传递特性的电缆接头绝缘状态检测方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1124-1132.
JIE Qingsong, YANG Qing, CUI Haonan, et al. Insulation state detection method of cable joint based on transient voltage transfer characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1124-1132.

[6] 王华楠, 王霞, 余栋, 等. 110 kV 电缆中间接头的合闸过电压仿真研究[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 127-135.
WANG Huanan, WANG Xia, YU Dong, et al. Study on closing overvoltage simulation of 110 kV cable intermediate joint[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 127-135.

[7] 孙欣宇, 吴铮, 伍铭妍, 等. 基于小缺陷扰动模型中压电缆附件综合绝缘性能评价方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(8): 142-149.
SUN Xinyu, WU Zheng, WU Mingyan, et al. Small defect disturbance model based comprehensive insulation performance evaluation method of medium voltage cable accessories[J].

- Southern Power System Technology, 2022, 16(8): 142-149.
- [8] 李海鸣. 10 kV 电缆中间接头小尺寸缺陷电场分布精确建模及分析[D]. 北京:华北电力大学, 2021.
LI Haiming. Modeling and analysis of electric field distribution for small defects in 10 kV cable joints[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [9] 游佳斌, 葛馨远, 陈剑, 等. 10 kV 电缆中间接头测温防爆装置的研究与设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2020(11): 153-156.
YOU Jiabin, GE Xinyuan, CHEN Jian, et al. Research and design of temperature measuring and explosion-proof device for 10 kV cable intermediate joint[J]. Automation & Instrumentation, 2020(11): 153-156.
- [10] 朱亮, 苏娟, 马振祺, 等. 10 kV 电缆中间接头故障解体分析[J]. 电工技术, 2021(23): 96-97.
ZHU Liang, SU Juan, MA Zhenqi, et al. Disassembly analysis of a 10 kV cable intermediate joint fault[J]. Electric Engineering, 2021(23): 96-97.
- [11] 李春阳, 陈先胜, 胡巍, 等. 电压稳定剂对电缆附件 EPDM 本体与绝缘界面耐电性能影响[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-12[2023-01-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20221103.1336.007.html>.
LI Chunyang, CHEN Xiansheng, HU Wei, et al. Effects of voltage stabilizers on the body and interface electrical strengths of EPDM for cable accessory [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-12[2023-01-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20221103.1336.007.html>.
- [12] ZHOU Z Y, LI J, CHEN H S, et al. Seasonal prediction of extreme high-temperature days in southwestern China based on the physical precursors [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2023, 40(7): 1212-1224.
- [13] 陈胤, 黄瑞梅. 基于电-热场耦合的 35 kV 电缆中间接头气隙缺陷仿真分析[J]. 电气技术, 2021, 22(10): 46-50, 70.
CHEN Yin, HUANG Ruimei. Simulation analysis of 35 kV cable joint with air gap defect based on electrothermal field coupling[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(10): 46-50, 70.
- [14] DU B X, TIAN M, SU J G, et al. Temperature gradient dependence on electrical tree in epoxy resin with harmonic superimposed DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 270-278.
- [15] DU B X, YANG Z R, LI Z L, et al. Temperature-dependent nonlinear conductivity and carrier mobility of silicone rubber/SiC composites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(3): 1080-1087.
- [16] 胡青云, 黄应敏, 胡超强, 等. 电缆附件用硅胶的热老化特性及其可靠性分析[J]. 粘接, 2021, 46(4): 33-36.
HU Qingyun, HUANG Yingmin, HU Chaoqiang, et al. Thermal aging characteristics and reliability analysis of silicagel for cable accessories[J]. Adhesion, 2021, 46(4): 33-36.
- [17] 范星辉, 谢月, 刘刚, 等. 不同温度下退役高压电缆绝缘介电特性研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 60-66, 74.
FAN Xinghui, XIE Yue, LIU Gang, et al. Insulation dielectric properties of retired high voltage cables at different temperatures[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 60-66, 74.
- [18] 赵学风, 郝一帆, 黄国强, 等. 基于有限元仿真的土壤直埋电缆中间接头稳态载流量计算[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 64-70, 85.
ZHAO Xuefeng, HAO Yifan, HUANG Guoqiang, et al. Calculation on steady-state current carrying capacity of intermediate joint of direct buried cable based on the finite element simulation[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 64-70, 85.
- [19] ZHAO A Q, GU L. Study on the temperature distribution of the outer surface of the cable intermediate joint based on ANSYS simulation[C]//2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China. IEEE, 2019: 20-23.
- [20] 赵莉华, 周冬冬, 闫志强, 等. 10 kV 交流三芯电缆中间接头直流化改造热-电耦合仿真研究[J]. 南方电网技术, 2021, 15(3): 105-112.
ZHAO Lihua, ZHOU Dongdong, YAN Zhiqiang, et al. Study on the thermal-electric couple simulation of DC transformation for 10 kV AC three-core cable joint[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(3): 105-112.
- [21] 林梓圻, 周贺, 牛林华, 等. 隧道敷设条件下超高压电力电缆热-流场耦合分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 216-223.
LIN Ziqi, ZHOU He, NIU Linhua, et al. Thermal-fluid coupling analysis of ultra-high voltage cables laid in tunnel[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 216-223.
- [22] 谢坤, 张伟, 张杰, 等. 高压电缆附件绝缘理化性能与电气特性研究[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(1): 8-16.
XIE Kun, ZHANG Wei, ZHANG Jie, et al. Research on physicochemical performance and electrical characteristics of insulating materials for high voltage cable accessories[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(1): 8-16.
- [23] 朱江. 基于多场耦合的电力电缆温度场仿真及其监测系统研究[D]. 北京:华北电力大学, 2017.
ZHU Jiang. Research on monitoring system and temperature field simulation of power cable based on multi field coupling [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [24] 陈梦曦. 10 kV 三芯电缆接头温度场的仿真研究[D]. 西安:西安科技大学, 2019.
CHEN Mengxi. Simulation study on temperature field of 10 kV three-core power cable joint [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [25] 郑文坚. 空气敷设电缆热一流耦合场仿真及其参数研究[D]. 广州:华南理工大学, 2018.
ZHENG Wenjian. The study of thermal-fluid coupling field simulation and parameters of cable in air [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [26] 刘刚, 王鹏宇, 毛健琨, 等. 高压电缆接头温度场分布的仿真计算[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3688-3698.

LIU Gang, WANG Pengyu, MAO Jiankun, et al. Simulation calculation of temperature field distribution in high voltage cable joints [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44 (11) : 3688-3698.

[27] 郝一帆, 李嘉明, 陈曦, 等. 直埋直流电缆中间接头稳态载流量计算[J]. 电线电缆, 2020(6):30-34.

HAO Yifan, LI Jiaming, CHEN Xi, et al. Calculation of steady-state current carrying capacity of intermediate joint of direct buried DC cable[J]. Wire & Cable, 2020(6):30-34.

作者简介:



卢斌先

卢斌先(1969),男,博士,教授,研究方向为电晕放电、电压测量、10 kV 中压电缆附件的热扩散特性(E-mail:lbx@ncepu.edu.cn);

薛涛(1998),男,硕士在读,研究方向为电缆绝缘、电缆热扩散特性;

王宜静(1971),女,学士,高级工程师,从事工业电气自动化、电力系统分析等工作。

Current carrying capacity analysis of 10 kV cable joint under extremely high temperature

LU Binxian¹, XUE Tao¹, WANG Yijing², SUN Xinyu¹, WU Zheng³, JIAO Chongqing¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 100096, China;

2. Heilongjiang Provincial Government Investment Project Construction Management Center, Harbin 150001, China;

3. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510410, China)

Abstract: With the increase in ambient temperature around the world in summer, the working environment of cable joints is deteriorating. Based on the finite element method, a simulation model for temperature analysis in a 10 kV three-core cable and the joints is established. The temperature distribution is analyzed under different ambient temperatures and different currents. Firstly, the temperature rise experiments are carried out to obtain a steady temperature on the surface of the cable joint, which verifies the accuracy of the simulation model. Then, the relationships between the surface temperature and the current of the high voltage current carrying conductor of the joint under different ambient temperatures are fitted. The ultimate safe current carrying capacity of the joint under the different ambient temperatures can be calculated by using these related functions. The results show that the increase of ambient temperature has little effect on the temperature distribution trend of the high voltage conductor surface of the joint, which also meets this rule on the outer surface of the outer sheath. The relation of the surface temperature on the high voltage conductor of the joint to the current is approximately a quadratic function. When the current amplitude is 480 A and the ambient temperature is 75 °C, the highest temperatures on the surface of the high-voltage current-carrying conductor and the outer surface of the outer sheath are 1.57 and 1.69 times higher respectively than at an ambient temperature of 30 °C. When the ambient temperature exceeds 55 °C, the continuous allowable current carrying capacity specified in the national standard can make the high voltage copper conductor of the joint exceed the maximum permitted operating temperature of 90 °C. Considering the continuous increase in summer ambient temperature since 2020, the continuous allowable current carrying capacity of the intermediate joint of 10 kV copper conductor three-core cross-linked polyethylene insulated cables in the GB needs to be improved and perfected.

Keywords: three-core cable; joint; cable trench; extremely ambient temperature; finite element method; current carrying capacity

(编辑 陆海霞)