

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.007

不同变压器池火面积对换流站阀厅火灾的模拟研究

焦洋洋¹, 杜玉格¹, 向林¹, 李飞¹, 李晓捷²

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 高压换流阀变压器与阀厅相邻,一旦着火,火焰蔓延将会严重威胁到阀厅内主要换电设备换流阀的正常运行。为探究换流变压器火灾发展对阀厅影响机理,基于FDS软件构建高压换流站阀厅模型,分析变压器池火面积为2、5、10 m²工况下火灾发生时阀塔内烟度蔓延、可视度及温度分布情况,探究池火后对阀塔的影响。进一步的,对池火发生后的阀厅进行了轰燃性分析。结果表明:变压器发生池火时,3种工况下在起火发生900 s后,可见度均降低至5 m以下,大大影响救灾人员对灾情的研判。在2 m²池火发生后,火焰发展后对阀塔造成热损伤较小,在5、10 m²两工况下,池火发生后,阀塔热损伤较大。在10 m²池火发生时,轰燃需满足上层烟部温度为528 ℃,模拟工况轰燃可能性较小。

关键词: 变压器; 池火; FDS模拟; 烟气蔓延; 轰燃

Numerical Simulation Study on the Effect of Different Transformer Pool Fire Areas on Valve Hall Fires in Converter Stations

JIAO Yangyang¹, DU Yuge¹, XIANG Lin¹, LI Fei¹, LI Xiaojie²

(1. Xuji Electric Co., Ltd., Henan Xuchang 461000, China; 2. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The high-voltage converter valve transformer is adjacent to the valve hall. In the event of a fire, the flame spread will severely endanger the normal operation of the converter valve - the core power conversion equipment within the valve hall. For exploring the influence mechanism of fire development of converter transformer on valve hall, the valve hall model of high voltage converter station is constructed based on FDS software. The smoke spread, visibility and temperature distribution in valve tower are analyzed when the fire area of transformer pool fire is 2 m², 5 m², 10 m², and the influence of pool fire on valve tower is explored. Furthermore, the flashover analysis of the valve hall after the pool fire is carried out. The results show that in case of pool fire in the transformer, the visibility is reduced to less than 5 m after 900 s of the fire under three working conditions, which greatly affects the disaster relief personnel's assessment of the disaster. After the 2 m² pool fire occurs, the flame development causes less thermal damage to the valve tower. Under the two working conditions of 5 m², 10 m², the thermal damage of the valve tower is larger after the pool fire occurs. In the event of a 10 m² pool fire, the flashover needs to meet the upper smoke temperature of 528 ℃, and the likelihood of the flashover under simulated conditions is small.

Key words: transformer; pool fire; FDS simulation; smoke spread; flashover

0 引言

随着大电网以及电力电子技术的发展,直流输电得到了飞速发展。换流站作为直流输电系统的核心,其作用是将交流电变换为直流电或者将直

流电变换为交流电^[1-4]。在换流站中,换流变压器具有较高的火灾风险,换流器内部的火灾事故大多源于换流变压器。由于换流变压器存在大量变压器油,一旦引燃,其对悬吊于阀厅顶部的换流阀阀塔造成巨大影响,甚至高温可能导致阀塔内其他元件故障

收稿日期:2026-02-03; 修回日期:2026-04-14

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2400603)。

Project Supported by National Key Research and Development Program(2021YFB2400603).

而形成新的起火点,严重危害着换流站的消防安全。近年来,大部分换流站火灾事故均源于换流器故障^[9],如2008年兴仁换流站火灾、祈南换流站等。换流器故障在换流站火灾中,不仅烧毁贵重元器件带来巨大损失且影响正常供电,另外阀厅内可燃物着火燃烧产生的有毒气体,使得消防救援人员救援难度增大。因此,开展换流阀阀塔火灾事故发生机理以及火灾事故危险性的论证与分析对于提升换流阀阀塔以及整个阀厅的火灾防护技术具有重要意义^[6-9]。

在换流站中,换流变压器具有较高的火灾危险性,有很多相关的研究集中在换流变压器火灾上。张佳庆^[10]等人采用CFD数值模拟技术研究了典型特高压换流站变压器火灾的发生和发展过程,具体分析了其燃烧形式、热释放速率大小及火源周边温度特性等。Su等人^[11]基于泡沫喷淋灭火过程建立了灭火计算模型,将其应用于110 kV变压器火灾的模拟。Heskestad等人^[12]研究了直径1.2 m的油盘中变压器油在岩床上燃烧的池火灾试验,说明了岩石层结构能起到一定冷却的作用。但采用岩床结构使得维修工作量增大,因而Lindström^[13]等人探究了变压器凹坑火灾采用型材板的灭火性能,研究结果表明,采用型材板替代岩床可作为新的灭火方案。2020年,郭王勇^[14]等人开展了变压器油池火实验,探究了池火的发展过程,并针对火灾危险性进行评估。此外,还有部分学者探讨了变压器油以及变压器绝缘纸板等着火时燃烧特性^[15-20]。

换流变压器与阀厅相邻,一旦隔火失败,变压器火灾可能会蔓延到整个阀厅,其对阀厅内的其他设备构成威胁。然而,基于换流变压器火灾发展对阀厅影响的探究鲜有报道。文中以中国某典型换流站为基础,构建换流阀阀厅计算模型,针对换流变压器火灾侵入阀厅这一火灾工况开展模拟分析,主要从烟气蔓延情况以及阀厅温度等方面对火灾后果进行分析与评价。进一步的,文中对该火灾情况进行了轰燃可能性分析,研判三种池火模型下阀厅重大灾害发生的可能性。

1 仿真模型建立

文中采用火灾现场模拟软件FDS进行数值模拟,该软件采用数值方法求解火灾浮力驱动的低马赫数流动的Navier-Stokes方程^[21],重点计算火灾中烟气和热传递过程。利用该火灾模拟软件,可以得到建筑物或构筑物在特定火灾条件下的烟雾蔓延过程和火灾参数,目前它被广泛应用于许多火灾相

关的研究中^[22-24]。

国内某高压换流站构建换流阀阀厅模型见图1。如图1所示,为阀厅内部示意图。阀厅整体采用钢结构,其内部长宽高尺寸为86 m×35 m×25 m,阀厅内共设有6个阀塔,分别标记为1-6号。阀塔均悬吊于顶棚下方,阀塔屏蔽罩底部距悬吊点高度为14 m。单个阀塔均有4个阀层,阀层采取错层布置,阀塔上下层屏蔽罩之间高度约为6.8 m。为了模拟变压器油池火隔火失败后从换流变压器开始蔓延到阀厅的火灾情况,模型中设置了着火火源点,其位置设定在靠近换流变压器的阀厅墙壁处。

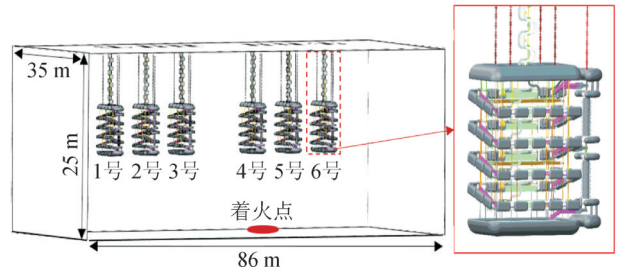


图1 阀厅模型图

Fig. 1 Model of valve hall

文中选择变压器池火面积作为变量进行火灾仿真分析,分别对不同池火面积下热释放速率进行计算推导。油池火的发展过程的质量损失速率为^[25]

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-k\beta D}) \quad (1)$$

式(1)中: $\dot{m}''$ 为燃料质量损失速率; $\dot{m}''_{\infty}$ 为无限大直径油池火质量损失速率,此处根据变压器油取值 $0.039 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; D 为有效直径; k 为消光吸收系数; β 为平均光束长度校正系数,此处 $k\beta$ 取值 0.7 m^{-1} 。

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (2)$$

$$\dot{Q} = \chi \cdot \Delta H_c \cdot \dot{m}'' \cdot A \quad (3)$$

式(3)中: A 为池火面积; $\dot{Q}$ 为热释放速率; ΔH_c 为燃烧热,变压器油理论值为 46.4 MJ/kg ^[26]; χ 为燃烧效率。通过锥形量热仪测得的变压器油的实际燃烧热约为 38.4 MJ/kg ,因此变压器油的燃烧效率约为0.83。通过式(1)、(2)计算得到燃料质量损失速率,代入式(3),计算出热释放速率。

通过国内外几起典型特高压变压器火灾现场情况^[27]及热释放速率梯度设定,将变压器池火面积选择为 $2, 5, 10 \text{ m}^2$,计算所得3种工况下的结果见表1。

依据各工况火源功率大小结果,进行网格敏感性分析。参照FDS手册^[28]计算火灾特征直径 D^*

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (4)$$

表1 3种工况下的热释放速率

Table 1 Heat release rate under three conditions

工况编号	池火面积/m ²	等效直径/m	热释放速率/kW
1	2	1.60	2 021.18
2	5	2.52	6 226.36
3	10	3.57	13 784.82

式(4)中:空气的密度 ρ_a 取值为 1.164 kg/m^3 ;环境空气比热容 c_p 为 $1.013 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$;环境温度 T_a 取 293 K ;重力加速度 g 取 9.8 m/s^2 。

δ 为网格大小尺寸(m),据手册推荐 D^*/δ 取值应在4~16之间。文中仿真模型选择网格大小为 $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$,依次计算3组工况下 D^*/δ 为5.1、8.0、11.0,均在要求范围内,即模型仿真网格大小较为合适。

2 结果讨论与分析

2.1 烟度分析

3种工况下烟雾的发展过程见图2。由图2可知,当变压器池火发生30 s后,3种工况下烟气均已蔓延到阀厅顶部,此时工况1、2组阀厅顶部还未完全覆盖,而工况3阀厅顶部整个区域已经覆盖。对比池火发生210 s后3组工况下烟雾发展情况,工况2、3两组烟雾基本完全覆盖住6个阀塔整体区域,而此时工况1烟雾仅蔓延遮盖住阀塔上两层。当池火发生后600 s,3组工况下6个阀塔均已被烟雾遮盖,且第3组烟雾基本充满整个阀厅。

为了进一步分析变压器油池火后阀厅烟雾发展情况,沿着换流阀阀塔中心位置竖向切片,分析在不同时刻下各组工况阀厅能见度,见图3。

由图3可知,工况1条件下,起火发生210 s后,阀塔悬吊结构处能见度约为8~15 m,阀塔能见度才逐渐降低。600 s时,阀塔上半层能见度逐步下降到

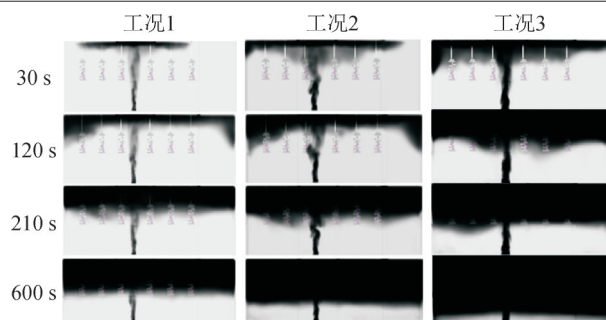


图2 烟雾蔓延过程图

Fig. 2 The process of smoke spread

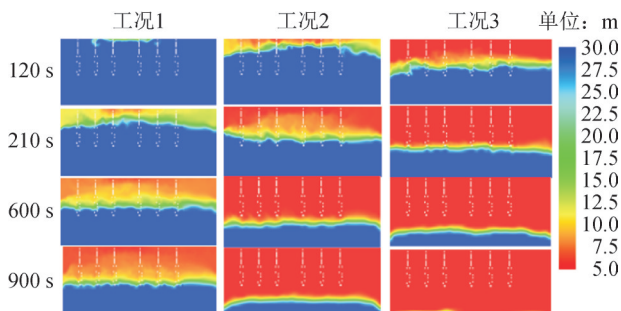


图3 阀厅能见度分布图

Fig. 3 Valve hall visibility distribution

10 m左右,继续发展到900 s时,阀塔上层能见度低于5 m。工况2条件下,起火发生120 s后阀塔能见度便已经开始逐渐降低。起火发展到600 s时,整个阀塔能见度已经均低于5 m以下。工况3条件下,起火发生120 s后,阀塔悬吊结构部分能见度已经低于5 m。210 s时,阀塔整体能见度已全部低于5 m。发展到900 s时,整个阀厅能见度基本均低于5 m。

2.2 温度分析

为了进一步分析火灾发生后阀厅温度情况,对换流阀阀塔中心位置竖向切片,分析不同工况下阀厅各部分温度分布。

3种工况下起火后不同时刻阀厅温度分布见图4。

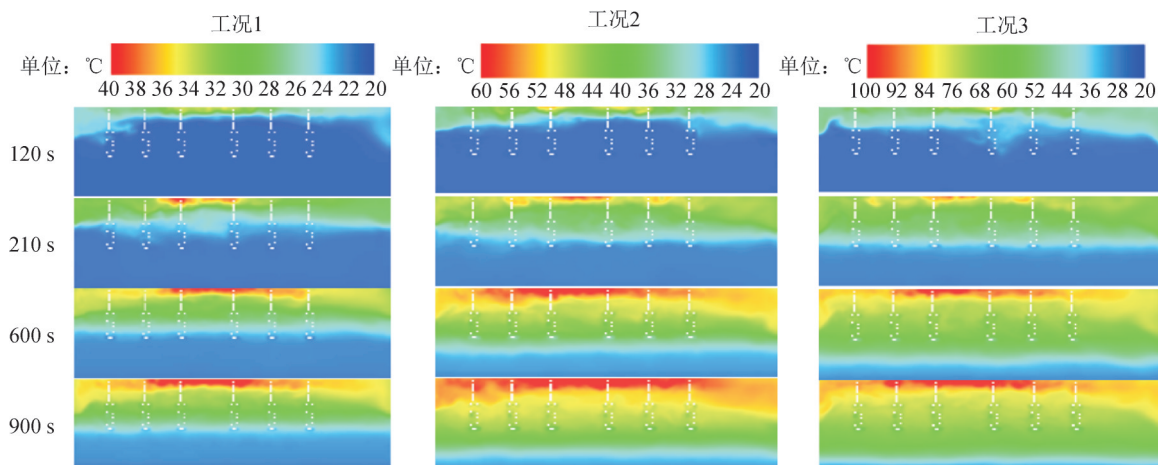


图4 阀厅温度分布图

Fig. 4 Valve hall temperature distribution

由图4可知,工况1条件下,起火发生后120 s,阀厅顶棚处温升区域面积逐步扩大,最大温升约为15℃。起火600 s后,阀厅上部大部分区域温升在10℃左右,顶棚处最高温升约为20℃。随着火灾的发展,阀厅内整体温度逐渐增高,900 s后,阀厅顶棚下方阀塔悬吊结构和光纤高度处温度约为35~40℃,阀塔所在高度处温度约为28~33℃。工况2条件下,起火发生后120 s,阀塔悬吊结构处温度逐渐升高,温升约为10~25℃。着火进一步发展到600 s后,整个阀塔区域温升约为25℃。900 s后,阀塔悬吊结构和光纤高度处的温度超过了60℃,阀塔

范围内温度约为45℃。工况3条件下,起火后120 s,阀厅悬吊装置以及光纤高度处温度约为40℃。起火后210 s,阀塔区域内温度明显增高,平均温度约为60℃,此后阀厅内温度进一步升高,起火后900 s,整个阀厅内温度均大幅度升高,阀厅顶棚下方温度达到100℃,阀塔区域平均温度已高达68℃。

为了进一步量化分析3种工况下阀厅温度分布,3种工况下3号、6号两个阀塔随高度变化的温度切片分布见图5。以阀塔底部屏蔽罩为起始点,每隔0.5 m设置一个温度监控点,阀层顶部点与底部相隔约6.5 m。

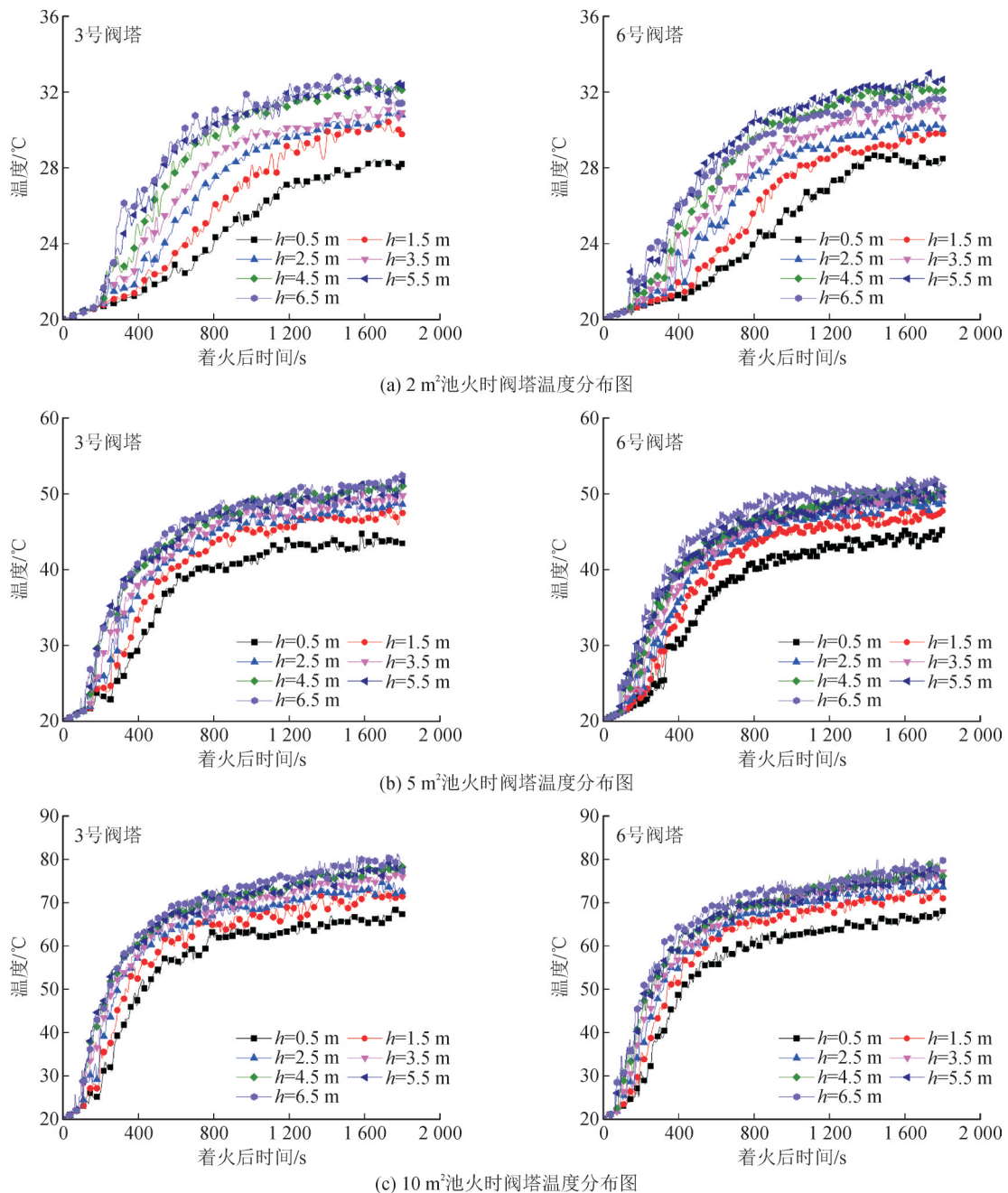


图5 3种工况下阀塔温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution of valve tower under three working conditions

由图5可知,无论何种工况下,阀塔不同高度处温度变化趋势基本相同,在竖直方向上形成温度梯度,且越靠近阀塔顶部位置监测点温度越高,这主要是由于变压器油池火所产生烟气在浮力作用下向上蔓延,受到顶棚的阻挡形成水平方向上的射流,受到四周墙壁的阻挡形成壁面射流,最终在浮力与烟羽流卷吸的共同作用下形成较为稳定的烟气层。随着燃烧的进行,烟气层逐渐下降,达到阀塔悬吊高度后引起阀塔内温度升高,变压器油池火所产生的高温烟气在此过程中热量以热辐射、热对流和热传导的方式不断的向周围空间传递,同时下部的冷空气也被不断的卷吸进入烟气层,因此烟气在流动过程中温度会不断下降,曲线出现震荡现象。当着火发生1 600 s后,燃烧逐渐达到稳定状态,温度监测结果均逐渐趋近于平衡状态,以此平衡时温度判断阀塔内部元器件是否会造成热损伤。工况1条件下,阀塔最高温度仅为32℃,该程度温升不会对阀塔内部元器件造成热损伤。工况2条件下,阀塔最高温度为52℃,阀塔内电气元件长期在此温度下运行可能会发生损坏甚至因故障而导致二次着火。工况3条件下,阀塔内最高位置的温度测量点处测得温度最大值约为81℃,在此温度水平下,阀塔内元件的正常运行受到威胁,同时也大大增加了元件故障起火概率。

2.3 轰燃可能性分析

轰燃指室内火灾发展过程中,暴露在辐射热中的可燃物表面几乎同时达到燃点,火灾在空间内快速传播,最终导致整个房间或者室内区域均卷入火灾的一种过渡阶段^[29]。阀厅中火灾的热辐射主要来自火焰和高温烟气层,由于阀厅空间较大,火焰相比于阀厅空间来说体积很小,若达到“所有可燃物表面几乎同时达到燃点”,则辐射热几乎完全是来自于高温烟气层^[30]。文中基于火灾动力学理论以及传热理论,对阀厅内发生轰燃的条件进行理论分析。

工况3条件下顶棚射流区示意图见图6。如图6所示,工况3条件下着火900 s后,烟气层几乎下降到阀厅地面,此时仅顶棚叫器区域温度较高,该区域即为顶棚射流区域,顶喷射流厚度约为阀厅高度的0.05~0.12倍^[31],本研究考虑到辐射传热特性,接收点与辐射面距离越近,所接收到辐射热通量越大,因此在本研究中假设顶棚射流厚度为阀厅高度0.12倍,即3 m。

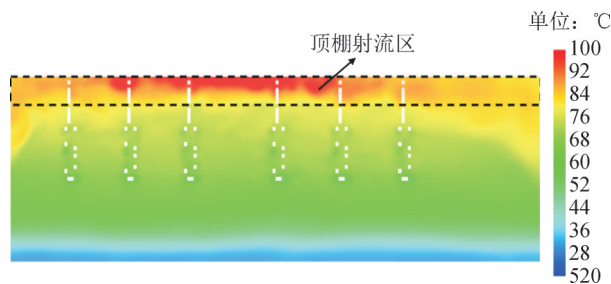


图6 工况3条件下顶棚射流区示意图

Fig. 6 The schematic diagram of ceiling jet zone under condition 3

根据热辐射理论,辐射力为 E 的黑体或者灰体表面 A_1 辐射的辐射能中,落在表面 A_2 的微元面 dA_2 上的辐射热通量为

$$\dot{Q}'' = E \int_0^{A_1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 = \Phi E \quad (5)$$

式(5)中, Φ 为 dA_2 相对于 A_1 的角系数。

在分析中假设高温烟气层为黑体,则辐射力为

$$E = \sigma T^4 \quad (6)$$

式(6)中: σ 为斯—玻常数,取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T 为辐射面温度。

根据轰燃定义和上述分析,达到轰燃时,空间内可燃物由于烟气的热辐射而被引燃,取阀塔内典型聚合物的最小引燃辐射热通量(CHF)中,其值越大越容易被引燃,取阀塔中聚酰胺材料值最大为 $20 \text{ kW}/\text{m}^2$,以此判断阀塔内所有聚合物均被引燃^[32]。

由于角系数具有加和性,在分析中以3号阀塔所在位置为分界将上部烟气层区域分成4部分,见图7,将3号阀塔所在位置定为4个小矩形辐射面的正交线交点中心。

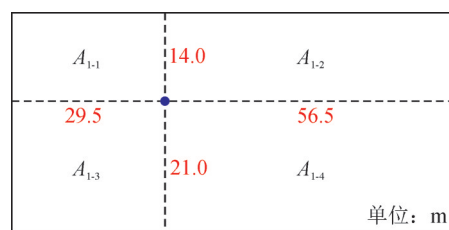


图7 角系数计算中矩形辐射面分割方法示意图

Fig. 7 Segmentation method of rectangular radiant surface

对于4个小矩形辐射面,角系数计算参数见表2, D 取值为阀塔最下层绝缘罩到烟气层下表面的距离。

表2 角系数参数

Table 2 Angle coefficient parameters

矩形辐射面	长 L_1/m	宽 L_2/m	距离 D/m	D/L_2	D/L_1
A_{1-1}	29.5	14	10.5	0.75	0.36
A_{1-2}	56.5	14	10.5	0.75	0.19
A_{1-3}	29.5	21	10.5	0.50	0.26
A_{1-4}	56.5	21	10.5	0.50	0.19

查阅角系数参考文献,计算所得3号阀塔所在微元面的角系数和 $\Phi=0.84$ 。结合式(5)、(6),计算轰燃所需烟气层温度 $T=528.83\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由上节分析,工况3条件下在稳定燃烧阶段,顶部烟气层温度也仅升高至约 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,远低于该工况下轰燃所需的烟气层温度。同时,考虑到阀厅内设置有完善的火灾监控和消防系统,着火火灾后不可能在完全不受控制的条件下持续燃烧。另外,以上的理论分析中包含了以下假设:①在热辐射计算中,将烟气层视为黑体,忽略了其发射率;②在考虑阀塔内部聚合物由于辐射而引燃过程中,忽略了阀塔不燃金属屏蔽罩对于热辐射的阻碍作用。因此在真实条件下,发生轰燃时所对应的阀厅上部烟气层温度要比理论计算值更高。综上所述,文中所研究工况下轰燃发生的可能性极小。

3 结论

文中构建了换流阀厅计算模型,基于换流变压器火灾侵入阀厅这一实际情况,开展3种工况下的模拟仿真,具体分析了3种工况下阀厅着火后烟度及温度发展情况,进一步的,探究了该模拟情况下发生轰燃的可能性,主要结论如下。

1)变压器池火发生后,3种工况下在起火发生900 s后能见度均降低到5 m以下,严重影响救灾人员对火灾情况的分析和判定。在 2 m^2 变压器油火灾工况中,着火发生900 s后,烟气层已完全笼罩住所有阀塔,阀塔能见度降至5 m以下;在 5 m^2 、 10 m^2 变压器油火灾工况中,烟气层分别在起火后约600、210 s后便已经完全遮盖住阀塔,阀塔能见度降低至5 m以下。

2)在 2 m^2 变压器油火灾工况中,阀塔最高温度 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$,对阀塔内部元器件造成热损伤可能性较小;在 5 m^2 、 10 m^2 变压器油火灾工况中,阀塔最高温度分别为 $52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $81\text{ }^{\circ}\text{C}$,阀厅内的温度处于相对较高水平,尽管不会对阀厅主体的钢架结构造成严重影响,但是在此温度水平下,可能会严重影响阀塔的正常运行,甚至由此引发元件故障而导致新的起火点生成。

3)在文中研究的3种变压器池火工况下,换流阀厅发生轰燃的可能性较小。若要使阀厅内发生轰燃的可能,阀厅上部烟气层温度至少需要 $528\text{ }^{\circ}\text{C}$,而即使是本研究工况中放热量最大的 10 m^2 池火,顶棚下方最高温度也仅 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,远远低于轰燃条件,即阀厅发生轰燃的可能性较小。

参考文献:

- [1] 赵晓君.高压直流输电工程技术[M].第2版.北京:中国电力出版社,2010.
Zhao Wanjun.HVDC transmission engineering technology[M]. 2nd ed.Beijing:China Electric Power Press,2010.
- [2] 李康,黄萌,查晓明,等.高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J].电力系统保护与控制,2024,52(9):174-187.
Li Kang, Huang Meng, Zha Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 174-187.
- [3] 姚琪,苏川,杨玉静,等.低碳背景下智能电网减排双目标调度规划方法[J].电网与清洁能源,2024,40(8):134-140.
Yao Qi, Su Chuan, Yang Yujing, et al. A dual-objective scheduling planning method for smart grid emission reduction under low-carbon background[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(8): 134-140.
- [4] 冯子毅,马恒瑞,王红霞,等.基于多类型传感器的变电站火灾预警技术研究综述[J].智慧电力,2024,52(10):103-111.
Feng Ziyi, Ma Hengrui, Wang Hongxia, et al. A research review of substation fire prevention and control technology based multi-type sensors[J]. Smart Power, 2024, 52(10): 103-111.
- [5] 高帅.基于Ansys的换流站阀厅防火封堵温度场的数值模拟与实验研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
Gao Shuai. Numerical simulation and experimental study on the temperature field of fire sealing in valve hall of converter station based on Ansys[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [6] 张佳庆,黄勇,周亦夫,等.水喷雾作用下特高压换流变压器火灾上部空间温度研究[J].高压电器,2023,59(10):140-145.
Zhang Jiaqing, Huang Yong, Zhou Yifu, et al. Study on temperature of upper space of UHVDC converter transformer fires under action of sprinklers[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 140-145.
- [7] 王帅,任军辉,娄彦涛,等. $\pm 525\text{ kV}/2\text{ GW}$ 海上风电柔性直流送出系统海上换流站设备选型探讨[J].高压电器,2022,58(7):11-17.
Wang Shuai, Ren Junhui, Lou Yantao, et al. Discussion on equipment selection of offshore converter station of $\pm 525\text{ kV}/2\text{ GW}$ offshore wind power flexible DC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 11-17.
- [8] 范慧芳,咸日常,刘兴华,等.基于能量系数的电力变压器热故障严重性评估方法[J].电测与仪表,2024,61(2):83-88.
Fan Huifang, Xian Richang, Liu Xinghua, et al. Evaluation method of thermal fault severity of power transformer based on energy coefficient[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 83-88.
- [9] 刘勇,宋磊,刘继银,等.油气阀室接地网状态的冲击检测方法研究[J].电瓷避雷器,2023(3):99-105.
Liu Yong, Song Lei, Liu Jiyin, et al. Impact detection method for grounding grid state of oil and gas valve chamber[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(3): 99-105.

- [10] 张佳庆, 李国辉, 汪亚龙, 等. 典型特高压换流变压器火灾数值模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(8): 1115-1120.
Zhang Jiaqing, Li Guohui, Wang Yalong, et al. Numerical simulation study on fire of typical UHV converter transformer[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(8): 1115-1120.
- [11] Su Lin, Zhang Jie, Que Xinggui, et al. Research on the numerical simulation of the 110 kV transformer fire extinguishing by foam spraying[C]//2014 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2014: 587-590.
- [12] Heskestad G, Dobson P H. Pool fires of transformer oil sinking into a rock bed[J]. Fire Safety Journal, 1997, 28(1): 33-46.
- [13] Lindström J, Försth M. Fire test of profile plank for transformer pit fire protection[J]. Fire Technology, 2016, 52(2): 309-319.
- [14] 郭王勇, 罗剑飞, 魏旭, 等. 小尺度变压器油池火灾燃烧特性的实验研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(12): 1645-1648.
Guo Wangyong, Luo Jianfei, Wei Xu, et al. Experimental study on the fire combustion characteristics of small-scale transformer oil pool fire[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(12): 1645-1648.
- [15] 陈庆, 景巍巍, 蔚超, 等. 变压器油池火非稳态燃烧特性实验研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(8): 1114-1117.
Chen Qing, Jing Weiwei, Yu Chao, et al. Study on the unsteady combustion characteristics of transformer oil pool fire[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(8): 1114-1117.
- [16] 范明豪, 张佳庆, 杜晓峰, 等. 典型变压器绝缘纸板燃烧特性试验研究[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(4): 443-446.
Fan Minghao, Zhang Jiaqing, Du Xiaofeng, et al. Experimental study on burning character of a typical transformer insulation board[J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(4): 443-446.
- [17] 张佳庆, 尚峰举, 何旭, 等. 变压器油沸溢池火温度特征及传热模型试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(11): 106-113.
Zhang Jiaqing, Shang Fengju, He Xu, et al. Study on temperature characteristics and heat transfer model of boilover in transformer oil pool fires[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(11): 106-113.
- [18] 闫海鹏, 詹振宇. 大型充油设备绝缘纸板燃烧特性研究[J]. 电力安全技术, 2022, 24(3): 44-46.
Yan Haiou, Zhan Zhenyu. Research on the combustion characteristics of insulating cardboard for large oil filling equipment[J]. Electric Safety Technology, 2022, 24(3): 44-46.
- [19] 欧蔓丽, 史宪鹏, 曹伟军, 等. 建筑防火涂料研究综述[J]. 上海建材, 2023(3): 37-45.
Ou Manli, Shi Xianpeng, Cao Weijun, et al. Review of research on building fire-resistant coatings[J]. Shanghai Building Materials, 2023(3): 37-45.
- [20] 李博宇, 郝治国, 李斯盟, 等. 油浸式电力设备内部电弧引发的压力特征[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 198-206.
Li Boyu, Hao Zhiguo, Li Simeng, et al. Pressure characteristics of oil-immersed power equipment under internal arc[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 198-206.
- [21] Temam R. Navier-stokes equations: theory and numerical analysis[M]. American Mathematical Society, 2001.
- [22] 陈晓捷, 陈盼, 汪逍旻. 柔性直流换流站 IBGT 阀厅防火措施跳闸逻辑设计技术[J]. 电工技术, 2017(12): 1-2.
Chen Xiaojie, Chen Pan, Wang Xiaomin. Logical design technology for trip of fire prevention measures in IBGT valve hall of flexible DC converter station[J]. Electric Engineering, 2017(12): 1-2.
- [23] 熊旭国. 柔性直流换流站阀厅消防系统分析[J]. 科技创新与应用, 2016(34): 291.
Xiong Xuguo. Analysis of fire protection system in valve hall of flexible DC converter station[J]. Scientific and Technological Innovation and Application, 2016(34): 291.
- [24] 钟波, 赵长征, 张泽江, 等. 在运换流站阀厅防火封堵系统加强技术研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(3): 357-360.
Zhong Bo, Zhao Changzheng, Zhang Zejiang, et al. Research on strengthening techniques for fire stop system of existing converter station valve hall[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(3): 357-360.
- [25] Hurley M J, Gottuk D T, Hall J R, et al. SFPE handbook of fire protection engineering[M]. Springer, 2015.
- [26] 范明豪, 李伟, 杜晓峰, 等. 典型变压器油燃烧特性试验研究[J]. 华东电力, 2013, 41(9): 1865-1870.
Fan Minghao, Li Wei, Du Xiaofeng, et al. Experimental study of combustion characteristics of a typical transformer oil[J]. East China Electric Power, 2013, 41(9): 1865-1870.
- [27] 汪亚龙, 黎昌海, 张佳庆, 等. K150X 特高压变压器油火灾特性参数分析[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(4): 1361-1369.
Wang Yalong, Li Changhai, Zhang Jiaqing, et al. On the oil fire feature parameter analysis of the fire disaster initiated by the UHV K150X typical UHV transformer[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(4): 1361-1369.
- [28] McGrattan K B, Forney G P, Floyd J, et al. Fire dynamics simulator (version 4) - user's guide[M]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2004.
- [29] National Fire Protection Association. User's manual for NFPA 921: guide for fire and explosion investigations[M]. Quincy: National Fire Protection Association, 2004.
- [30] 季经纬, 李全峰, 陈金林, 等. 火焰与烟气层热辐射的实验与蒙特卡洛法模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 53-56.
Ji Jingwei, Li Quanfeng, Chen Jinlin, et al. Experiments and Monte-Carlo simulation of heat radiation flux from flame and hot smoke layers[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1): 53-56.
- [31] Alpert R L. Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors[J]. Fire Technology, 1972, 8(3): 181-195.
- [32] 王红双, 魏玲玲, 王冰松, 等. 软质聚氨酯泡沫热释放速率研究[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(5): 588-590.
Wang Hongshuang, Wei Lingling, Wang Bingsong, et al. Research on heat release rate of flexible polyurethane foam[J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(5): 588-590.
- 焦洋洋(1986—), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事电力安全评估等方面的研究(E-mail: 609549711@qq.com)。
- 向林(1995—), 男, 工学博士, 工程师, 从事高压输电系统装置设备的安全灾害评估工作(通信作者)(E-mail: xianglin_hust@163.com)。