

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.008

户内变压器火灾烟气及温度时空发展特性研究

苏文¹, 范明豪¹, 王海伟², 杨康博³, 黄钰期³

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230022; 2. 国网安徽省电力有限公司合肥分公司, 合肥 230022;
3. 浙江大学能源工程学院, 杭州 310027)

摘要: 水喷雾系统是变压器火灾抑制的重要手段。文中针对配备水喷雾系统的变压器室, 利用FDS软件对喷雾作用下的变压器室火灾发展进行了数值模拟研究, 获得火灾发展过程中的变压器室温度变化和碳烟生成及分布规律。结果表明: 对于无喷雾作用的情况, 处于燃烧区域的观测点1的最高温度可以达到966℃, 之后逐渐下降, 最终在500℃附近波动。燃烧产生的碳烟产生后首先聚集于变压器室顶部, 然后向四周扩散, 最终逐渐弥漫整个变压器室。喷雾的作用主要体现在降低火灾进程中同一时间的热释放速率及温度, 但对室内的烟羽流运动影响不大。喷雾液滴的运动与碳烟的运动轨迹接近。变压器室近壁面处的温度主要受到碳烟扩散的影响。

关键词: 变压器室; 火灾动力学模拟(FDS); 水喷雾

Study on the Spatial and Temporal Development Characteristics of Fire Smoke and Temperature in Indoor Transformer

SU Wen¹, FAN Minghao¹, WANG Haiwei², YANG Kangbo³, HUANG Yuqi³

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Hefei Branch, Hefei 230022, China; 3. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Water spray system is an important means for fire suppression of transformer. As for the transformer chamber equipped with water spray system, in this paper the FDS software is used to conduct numerical simulation research on the development of the fire in transformer chamber under the action of spray, and obtain the temperature variation and soot generation as well as distribution during the fire development process. The results show that in case of no spray the maximum temperature of observation point 1 in the combustion zone can reach 966℃, then gradually decreases and finally fluctuates around 500℃. The soot generated by combustion firstly accumulates at the top of the transformer chamber, then spreads around, and at last gradually diffuses throughout the entire transformer chamber. The role of the spray is mainly reflected in reducing the heat release rate and temperature at the same time during the fire process, but it has little effect on the indoor smoke plume movement. The motion of spray droplets is close to that of soot. The temperature near the wall of the transformer chamber is mainly affected by the diffusion of soot.

Key words: transformer chamber; fire dynamics simulation(FDS); water spray

0 引言

为节约城市用地和环保, 大量的城市变电站将主变放入室内。室内变压器常处于超负荷、高温运行状态, 具有一定的安全隐患, 出现问题后往往伴

随着火灾、爆炸等严重事故。

高压套管故障是导致变压器油箱爆炸并引发火灾风险的主要原因^[1-3]。变压器火灾大致可以分为4个阶段: 火灾初期阶段、火灾增长阶段、充分发展阶段和衰减熄灭阶段, 并具有隐蔽、立体多尺度

收稿日期: 2025-10-11; 修回日期: 2025-12-27

基金项目: 国网安徽省电力有限公司科技项目(B3120522001D)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd.(B3120522001D).

的燃烧特征^[4]。对变压器油池的燃烧过程进行研究,有助于了解变压器火灾特点。目前,已经有一些学者对油池燃烧的3个过程进行了研究^[5-7]。汪^[8]等通过实验得到了变压器油燃烧时平均火焰高度与油池直径和燃烧速率的关系。陈等^[9]使用锥形量热仪测试了KI25X和KI50X两种典型变压器油在不同外加热辐射通量下的点燃时间、热释放速率、生烟速率和烟气中毒性成分的浓度。黄等^[10]通过锥形量热仪对不同的植物绝缘油进行了燃烧特性参数试验,发现从防火安全考虑,天然酯植物油更适合作为变压器绝缘油。

鉴于利用实验进行变压器火灾研究具有耗费较高,污染大,而且难以获得详尽的实验数据等特点,一些学者尝试利用火灾动力学模拟软件FDS (fire dynamics simulator)进行研究。陈^[11]等通过数值模拟研究发现在自然对流条件下,变压器油燃烧产生的烟气充满室内变电站的时间随火源功率增加而减少,而不同火源功率下变压器室的温度分布相似。Antonio等^[12]则提出在使用FDS进行数值模拟时,发现模型受网格尺寸的影响。随着网格的尺寸变化,点火机制及扩散速率均会受到影响。

目前,在我国已建成的特高压输电工程中,变压器主要使用水喷雾灭火系统和泡沫喷雾灭火系统^[13-15],尝试使用全氟己酮喷雾灭火系统^[16]。陈等^[17]参照实际工程设计方式,建立了大型油浸变压器水喷雾灭火系统。张等^[18]选用220 kV变压器,对压缩空气灭火系统和泡沫喷雾灭火系统的灭火性能进行了对比,为大型变压器消防设计提供了实验依据。田等^[19]研究了喷雾强度、雾滴粒径以及初始速度对变压器火灾的灭火影响,发现对于变压器火灾存在最优灭火粒径范围。在部分工况下,喷雾行为反而会起到强化燃烧的作用^[20],而这部分因素在变压器室设计中往往被忽略。目前,关于喷雾系统对变压器室火灾的影响研究较少,在部分变电站和换流站中,对喷雾系统可能起到的实际作用及伴随的风险还存在争议。因此,文中通过搭建变压器室火灾及喷雾系统数值计算模型,分别对火灾发生时,启动和未启动喷雾时变压器室温度分布、燃烧进程以及碳烟生成和分布进行了研究与分析,为完善变压器室火灾救援方案提供参考。

1 数值模拟

1.1 变压器室模型

以安徽某变压器室为例,变压器室的总尺寸为

11 m×10.8 m×10 m(长×宽×高)。在变压器的下方有9.2 m×6.9 m的油池。变压器室内的几何结构见图1。在构建模型时,对变压器的结构进行了一定简化,如图1(d)中所示,主要保留了变压器油箱,储油柜(油枕)以及油箱两侧的散热结构。位于变压器上方的3个套管为易发生故障处,图1(a)中3个黄色圆圈显示了套管所处位置。在文中假设位于中间的套管发生故障并引起火灾,将套管处的燃烧区域简化等效为1 m×0.5 m的可燃区域,见图1(a)中绿色小方框。在距离地面高度为1.5、2.5、3.5 m,距离变压器主体四周0.5 m处,均匀分布有96个水喷雾喷头,图1中红色星号代表喷头所在位置。图1(d)中黄色墙面中的空白区域表示通风口,通风口两侧的棕色方框为门所在位置,并处于常闭状态。变压器主体下方的绿色区域表示绝缘油所在位置。为了后续方便描述,以变压器主体为中心,将变压器周围区域简单分为A、B、C、D侧,见图1(a)。绿色原点展示了7个温度观测点所在的位置,剖面E-E为变压器室对称面位置,剖面F-F距离门窗所在墙壁0.2 m。

1.2 网格划分

在使用FDS进行数值模拟时网格大小的选择方面,消防界已做了大量的工作。目前,0.1D*的方法已经得到了广泛的应用,并在过去的研究中显示出良好的结果^[21-22]。因此,作为初始网格的大小的选择,应该小于0.1D*,其中D*的计算为

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} T_{\infty} c_p \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

式(1)中:D*为特征火直径,m; \dot{Q} 为热释放速率,kW; ρ_{∞} 为环境空气的密度,kg/m³;T_∞为环境温度,K。

根据文献,对于型号为KI50X的变压器绝缘油,单位面积热释放速率最大值为783.26 kW/m²^[23]。假设发生火灾时,绝缘油铺满位于变压器下方的事故油池,计算得到D*为4.44 m,则网格尺寸应小于0.44 m,这里取为0.1 m。

1.3 边界条件及模拟参数

当发生火灾时,位于变压器箱体顶部的绝缘套管位置发生爆炸,同时变压器箱体内的绝缘油流淌至下方的事故油池区域。因此,本研究中的燃烧区域主要由套管位置与事故油池区域两部分组成。

根据典型城市户内变设备型号、结构、尺寸等特征的调研结果,设定燃烧区域的热释放速率为783.26 kW/m²,环境温度为20℃,环境压力为

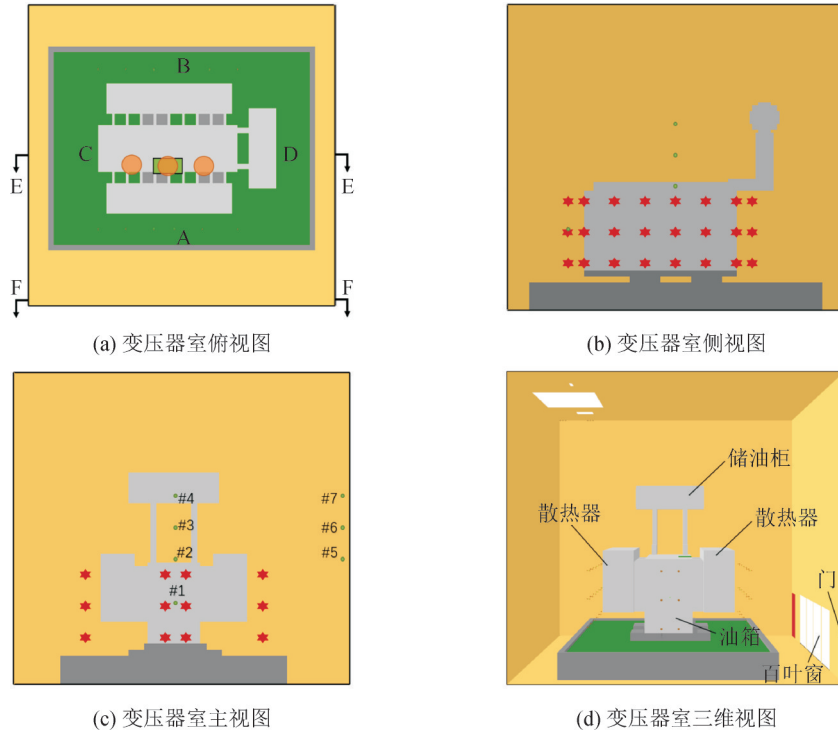


图1 变压器室几何结构图

Fig. 1 Geometric structure of transformer chamber

101 325 Pa^[24]。变压器室与外界通风只通过位于变压器室顶部的两个边长为0.6 m的通风口进行。为了重点考虑变压器室火灾发生后,喷雾系统作用下的变压器室内温度、颗粒场等,将喷雾的开启时间设定为火灾发生后的2.5 s(考虑烟雾报警器发送信号、确认和消防系统的响应时间),此时变压器室内的火灾已较为稳定。根据消防系统设计方案,喷雾系统中喷头的喷射角度为30°~80°,喷雾流量为50 L/min,水粒子在喷头的初始速度为5 m/s。在数值模拟计算中除了FDS自带材料外,主要用到3种自定义属性的材料,分别为绝缘油、变压器外壳以及建筑材料(墙、底座等)。其中,绝缘油的点燃温度为300 ℃。3种材料的自定义参数见表1。

表1 3种自定义材料参数

Table 1 Three custom material parameters

材料名称	导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	比热容/ [kJ·(kg·°C) ⁻¹]	密度/(kg·m ⁻³)
绝缘油	0.128	2.00	873
变压器外壳	48.000	0.48	7 850
建筑材料	16.700	0.71	3 440

2 数值计算结果与分析

2.1 模型验证

为了确保仿真所用模型的可靠性和准确性,选

取可靠的实验模型开展验证性分析。使用FDS建立了文[7]中直径300 mm油池火燃烧模型,并将仿真结果与文献中的实验结果对比见图2。结果发现,仿真中的火焰形态以及质量损失速率与实验结果有良好的一致性,表明本研究采用的仿真方法基本可靠。

2.2 变压器室内火灾发展进程及烟气分布规律

首先,考虑喷雾完全失效的情况下,变压器室火灾的发生和发展过程。从图3可以看出,随着时间的发展,处于变压器下方的着火区域逐渐增大。着火区域的发展方向偏向于变压器的C侧。当仿真时间达到360 s时,此时变压器室内的最高温度已经达到1 423 ℃以上。可以看出,随着火灾的发展,位于变压器下方的火焰在超出变压器范围后可通过依附于变压器表面而向上发展。变压器上方的温度主要受到燃烧过程中产生的碳烟影响。值得注意的是,位于C侧火焰上方的高温区域反而先出现在火焰两侧,见图3(c)、(d)中蓝色框线。这主要是因为碳烟在燃烧处生成之后,首先抵达变压器室的顶部,随后沿着顶部墙面向四周扩散,因此火焰两侧更早出现高温区域。

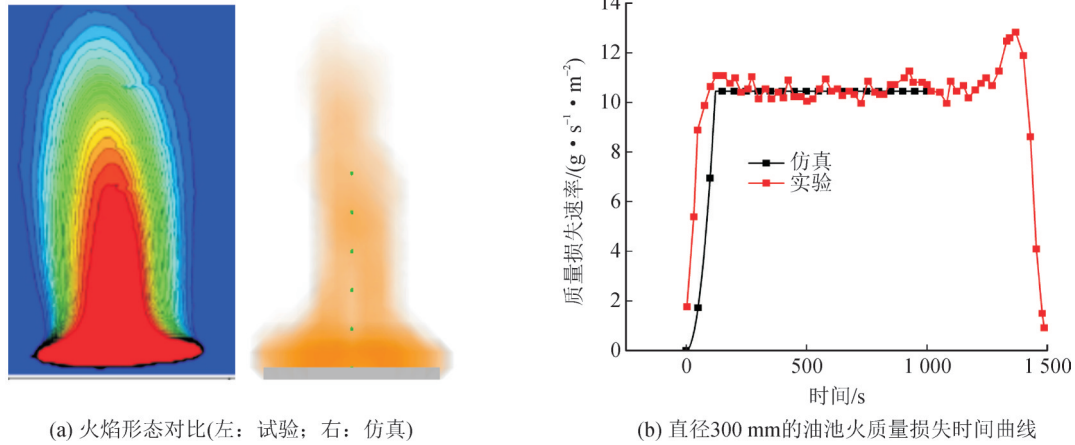


图2 直径300 mm的油池火仿真结果与实验对比图

Fig. 2 Comparison between simulation results and experimental results of oil pool fire with a diameter of 300 mm

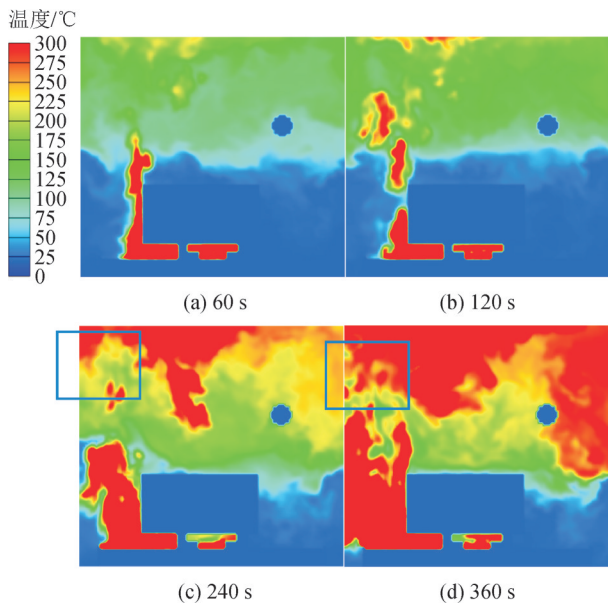


图3 变压器室对称面温度分布图

Fig. 3 Temperature distribution diagram of symmetrical plane of transformer chamber

无喷雾作用时变压器上方观测点2、3、4的温度见图4,从图4中可以看出,在同一时刻位于变压器上方的观测点呈现出位置越高,温度越高的特点。这是因为变压器上方的温度主要受到燃烧产生的碳烟影响。随着火灾的发展,碳烟在变压器上方不断积累,使得越靠近室内顶部的的位置温度越高。当碳烟积累达到一定程度时(220 s),观测点3、4的温度趋近于稳定,在200 °C附近波动。

火灾发展过程中的碳烟生成及分布规律见图5,从图5可发现随着时间的发展,变压器B侧区域的火焰扩散速度要快于变压器A侧区域。这可能是因为随着火灾的发展,碳烟颗粒逐渐在变压器的顶部区域积累。燃烧所需的新鲜空气主要来源于位于变压器A侧的通风窗,而燃烧生成的碳烟等则主要通过位于变压器B侧顶面的窗口扩散出变压器室,空气的流通使得变压器左侧区域的火焰扩散速度更

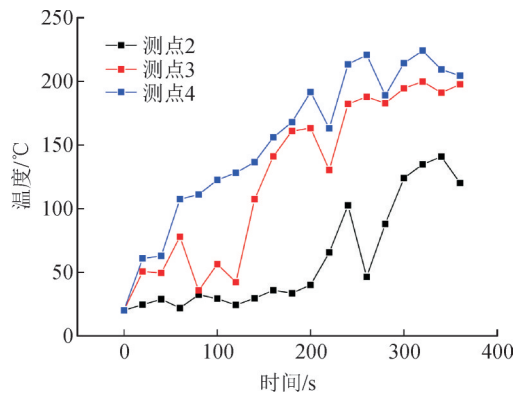


图4 无喷雾作用时变压器上方观测点温度

Fig. 4 Temperature of observation point above transformer without spray

快。碳烟的增加一定程度上减少了新鲜空气与燃料的接触,使得火焰总体的扩散速度相较于火灾初始阶段有所下降。

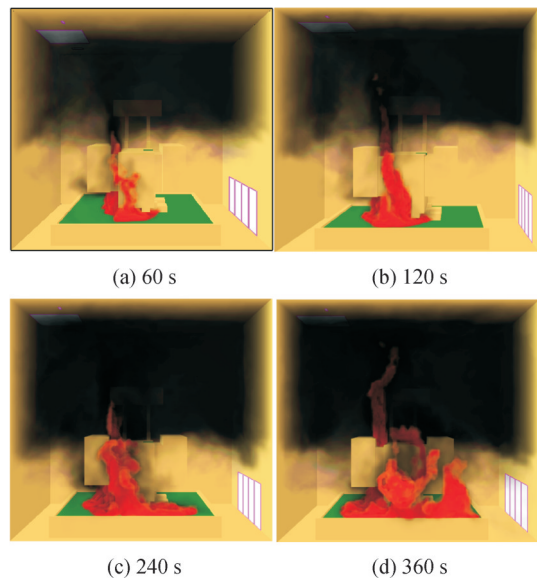


图5 不同时刻变压器室火灾发展及碳烟分布

Fig. 5 Development of transformer chamber fires and carbon smoke distribution at different times

为了掌握空间内的温度分布规律,从距离变压器室门所在墙壁0.2 m处取观测面,火灾初生时该位置的温度变化见图6。从图6可发现随着火灾的发展,距离门窗所在墙壁0.2 m处的温度呈现出明显的上部温度高,下面温度低的分布。这样的温度分布与图3中变压器对称面的温度分布明显不同。这是因为此处的高温主要由悬浮在变压器室上方的碳烟颗粒所形成。而随着碳烟浓度的不断增加,此处的最高温度也不断增加。当时间达到360 s时,此处的最高温度已经可以达到365 ℃。值得注意的是,此时靠近地表的温度大部分仍处于60 ℃以下,这一方面可能是由于碳烟在地表附近的分布较少,另一方面也可能是受到了通风窗的影响。

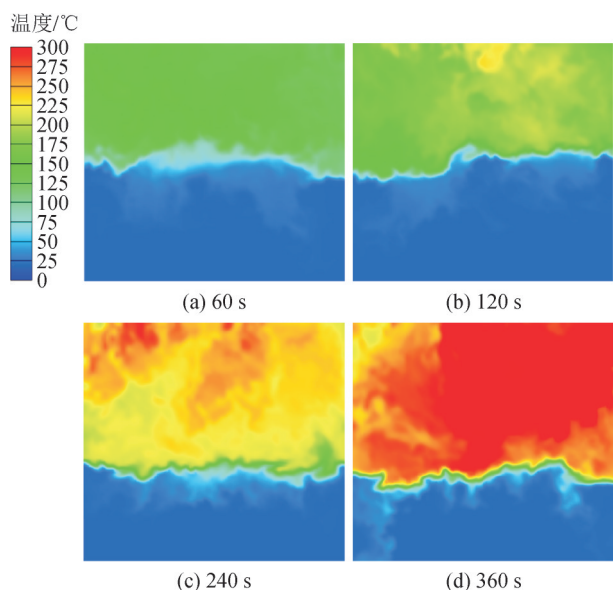


图6 距离门窗所在墙壁0.2 m处温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution diagram at 0.2 m away from the wall where the door and window are located

从靠近变压器室门所在墙壁0.2 m处的测点温度图(图7)可发现,位置越高的观测点,温度上升的时间越早。此外,近门窗处观测点5、6、7的温度上升时间早于变压器上方的观测点2、3、4,而且当观测点温度趋近稳定时,近门窗处的温度更高,在260 ℃附近波动。这主要是因为燃烧过程中所产生的碳烟经过上升并在变压器室顶部聚集后,向四周扩散,使得变压器室内靠近墙壁处的碳烟积累速度更快,图5(b)、(c)中的碳烟分布也证明了这一点。

在无喷雾作用下,变压器室火灾的总热释放速率以及观测点1的温度随时间的变化见图8。从图8中可以看出,随着火灾的发展,总的热释放速率在不断的增长,当火灾发展到300 s后,总热释放速率增长速度放缓。这可能是因为碳烟的增加减少了新鲜空气与燃料的接触。当仿真时间达到360 s

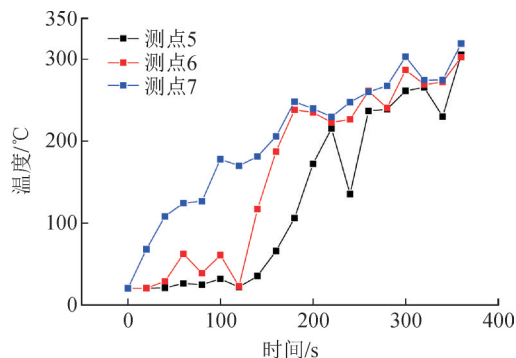


图7 无喷雾作用时近门窗处观测点温度

Fig. 7 Temperature of observation point near the door and window without spray

时,总的热释放速率已经到17 100 kW,并且还有不断上升的趋势。观测点1用来研究变压器周围燃烧区域的温度,可以看出,观测点1的温度在火灾初期有较高的增长速度,但当时间达到150 s时,随着时间的增加,观测点1的温度不再呈现明显的上升趋势。观测点1的温度最高可达966 ℃,随后在500 ℃附近波动。这主要是因为150 s之后,观测点附近下方的绝缘油基本已经处于燃烧状态,所以观测点的温度逐渐趋近于稳定。

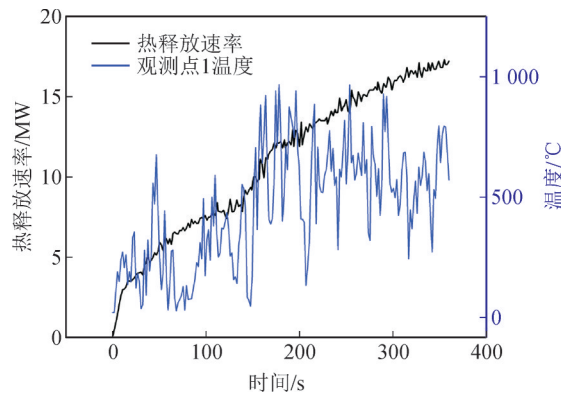


图8 总热释放速率及观测点温度随时间的变化

Fig. 8 Total heat release rate and temperature variation at observation points over time

2.3 水喷雾对变压器燃烧烟气及温度的影响机制

喷雾系统的启停主要受到温度的控制,当位于天花板的火灾监测点温度达到68 ℃时,喷雾的喷头自动打开。因此,文中也尝试在相应的温度下启动喷雾,此时对应的时间是火灾发生后18 s。从图9可见,相较于无喷雾作用的变压器室火灾,喷雾的作用大大降低了变压器室对称面的温度。一方面,火灾的最高温度从无喷雾作用的1 423 ℃降低到了最高温度694 ℃左右。另一方面,火灾的发展受到了喷雾的有效限制。见图9(c)、(d),随着时间发展,燃烧区域基本已经不再扩大范围。此外,依附于变压器表面的火焰所能达到的高度也明显降低。这

充分证明了喷雾系统在变压器室火灾的作用。但值得注意的是, 尽管火灾的范围不再扩大, 但火焰依旧未能完全扑灭。

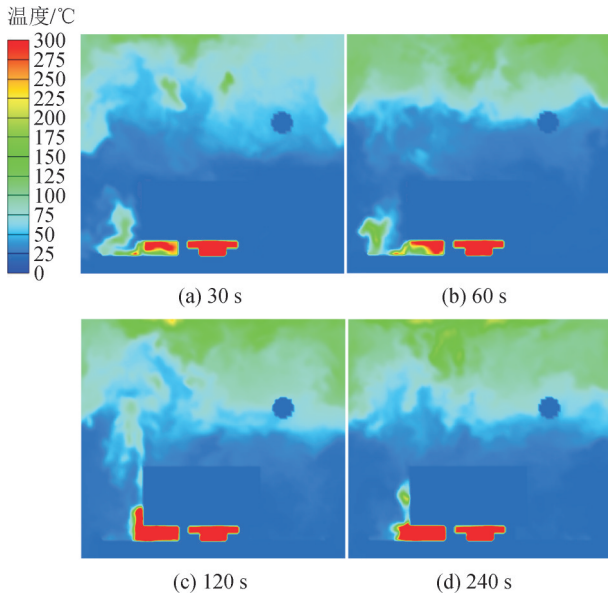


图9 喷雾作用下变压器室对称面温度分布图

Fig. 9 Temperature distribution diagram of symmetrical plane of transformer chamber under the action of spray

对比喷雾作用时变压器上方观测点温度(图10), 从图10可发现在喷雾作用下, 变压器上方的温度仍然呈现出测点位置越高, 温度越高的现象, 但对比无喷雾作用, 观测点的温度下降明显。这主要是因为喷雾抑制了火焰的蔓延从而限制了燃烧过程中碳烟的生成, 因此有效降低了室内温度。

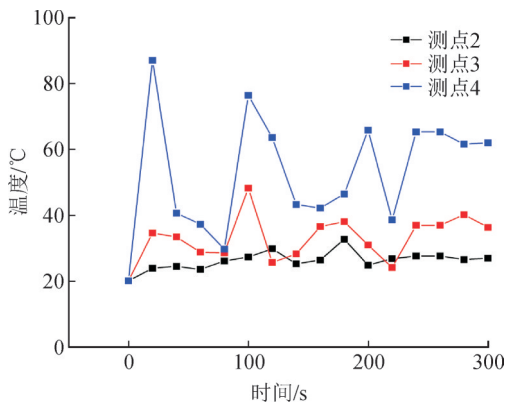


图10 喷雾作用时变压器上方观测点温度

Fig. 10 Temperature of observation point above the transformer under the action of spray

火灾发展过程中的碳烟生成及分布见图11, 从图11中可见, 碳烟的生成主要集中在变压器油箱与两侧散热器之间的夹缝中。碳烟生成后在变压器室的顶部汇聚, 然后往四周扩散。在时间到达18 s时, 喷雾开始起作用。一部分的喷雾液滴在变压器下方的绝缘油表面汇聚, 另一部分喷雾液滴受到烟羽流的影响悬浮在变压器的上方, 且整体有往变压

器室顶部的出口流动的趋势, 见图11(d)中红色箭头所示。但是, 在240 s内, 喷雾行为并不能有效扑灭火灾, 变压器仍然处于燃烧状态。

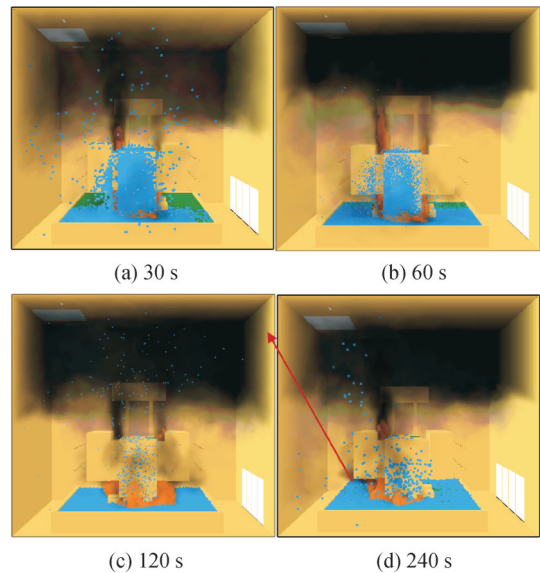


图11 喷雾作用下不同时刻变压器室火灾发展及碳烟分布

Fig. 11 Fire development and soot distribution in transformer chamber under the action of spray at different times

与图6相同位置下, 喷雾启动时的温度分布特征见图12。从图12可发现在燃烧至300 s时, 此处的最高温度为115 °C左右, 远低于无喷雾作用时的最高温度, 这主要是因为碳烟的生成量的减少。此时, 碳烟分布的高度相较于无喷雾作用时有着明显的升高, 这些都证明了喷雾在室内变压器火灾的良好效果。该区域相应测点的温度变化也体现了类似特征, 但同一时刻, 近门窗处观测点的温度明显高于变压器上方的观测点, 见图13。

将喷雾作用下的测点1温度和总体热释率对应起来考虑, 见图14, 从图14可发现虽然当喷雾开始作用时(18 s), 总热释放速率的增长速度有所下降, 测点1的温度也在25 s至85 s内逐渐保持在50 °C左右, 表明喷雾作用下火焰在一定程度上受到了抑制。然而, 随着火灾的持续发展, 观测点1的温度又将上升并反复波动, 虽然远低于无喷雾下的温度, 但在变压器油燃烧殆尽、火焰熄灭前仍具有较高的安全风险。

3 结论

文中采用数值分析方法研究喷雾行为对抑制城市户内变火灾的有效性开展了研究, 研究发现:

1) 当变压器室发生火灾而喷雾系统失效时, 绝缘油的持续燃烧会使得燃烧区域的温度不断上升,

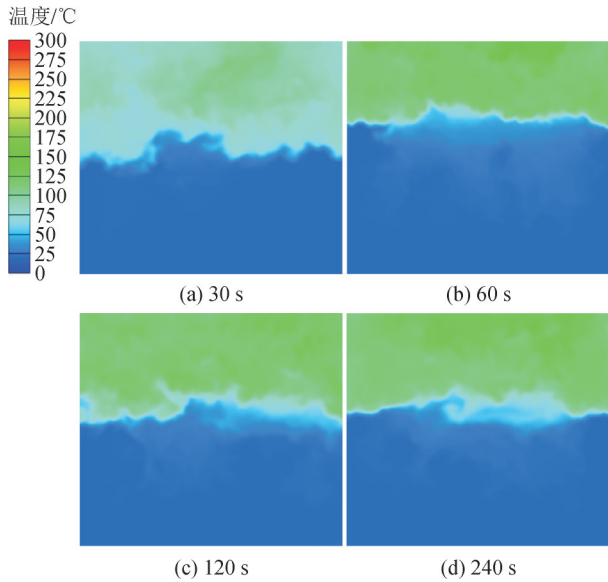


图12 喷雾作用下距离门窗所在墙壁0.2 m处温度分布图
Fig. 12 Temperature distribution diagram at 0.2 m away from the wall where the doors and windows are located under the action of spray

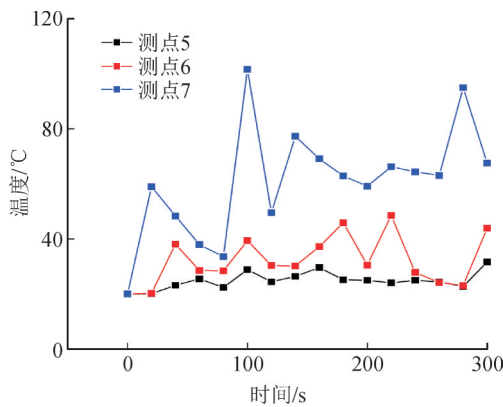


图13 喷雾作用时近门窗处观测点温度
Fig. 13 Temperature of observation point near the door and window under the action of spray

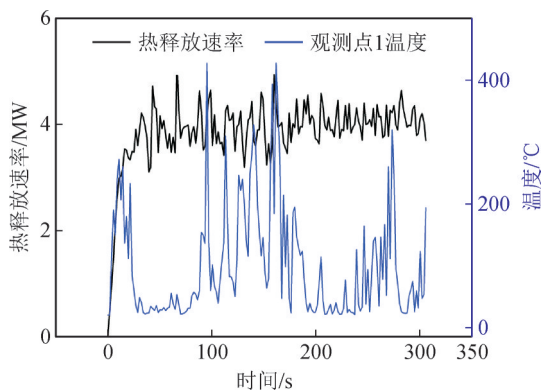


图14 喷雾作用下总热释放速率及观测点温度随时间的变化

Fig. 14 Change of total heat release rate and observation point temperature with time under the action of spray

在360 s左右变压器室的最高温度可达1 423 °C。但此时变压器主体周围靠近地表的未燃区域仍可能

保持较低的温度。

2)当喷雾系统失效时,在火焰扩散的过程中,变压器主体周围的火焰扩散速度并不一致。这可能是受到了燃烧过程中新鲜空气的补充以及碳烟颗粒的排放的影响,距离门窗所在墙壁0.2 m处的温度分布与变压器对称面的温度分布明显不同,其高温区域主要由燃烧过程中生成的碳烟聚集所形成,最高温度可达365 °C。这一规律可为变压器室内部监测系统的布置提供参考。

3)喷雾系统的启动可以显著的降低变压器室火灾的温度、有效减弱火焰扩散以及碳烟的生成。在喷雾作用下,变压器室的最高温度大约为694 °C,距离门窗所在墙壁0.2 m处的最高温度仅为115 °C,远低于无喷雾作用下的最高温度。

4)总体来看,水喷雾虽然能降低火灾时受限空间的温度,但并不能完全抑制火灾,也无法起到使火焰熄灭的作用,当变压器油持续燃烧时,喷雾与火焰将达到一种动态平衡,此时变压器室内温度分布不均且温差较大。因此,需要合理设计变压器室内监测系统的测点布置方案,才能准确掌握火灾发展进程,为保障救援安全提供参考。

参考文献:

[1] 陈涛,赵力增,傅学成,等. 大型换流变压器火灾事故特点与灭火方案[J]. 消防科学与技术,2020,39(8):1138-1141.
CHEN Tao, ZHAO Lizeng, FU Xuecheng, et al. Fire accident characteristics and firefighting solutions of large converter transformer[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(8): 1138 - 1141.

[2] 姜岚,陈云桥,王爽,等.基于实际气体模型的油浸式变压器爆炸应力分布研究[J]. 变压器,2024,61(1):29-34.
JIANG Lan, CHEN Yunqiao, WANG Shuang, et al. Study on stress distribution of oil-immersed transformer explosion based on actual gas model[J]. Transformer, 2024, 61(1): 29-34.

[3] 杨昊,胡文秀,张璐,等.基于ADASYN数据平衡化的PSO-BPNN变压器套管故障诊断[J]. 电力工程技术,2024,43(2):170-178.
YANG Hao, HU Wenxiu, ZHANG Lu, et al. Fault diagnosis of transformer oil-paper bushings in PSO-BPNN algorithm based on ADASYN data balancing[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 170-178.

[4] 戴晨蓉,陈光,朱博,等.室外变压器火灾燃烧特性全尺度实验研究[J]. 消防科学与技术,2020,39(3):318-321.
DAI Chenrong, CHEN Guang, ZHU Bo, et al. Full scale experimental research on combustion characteristics of outside transformer fire[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(3): 318-321.

[5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 汪亚龙, 黎昌海, 张佳庆, 等. KI50X 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 KI50X typical UHV transformer[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(4): 1361-1369.
- [9] 陈涛, 王雨薇, 张佳庆, 等. 典型变压器油燃烧特性及烟气危害性研究[J]. *消防科学与技术*, 2021, 40(8): 1125-1129.
CHEN Tao, WANG Yuwei, ZHANG Jiaqing, et al. Study on the fire characteristics and smoke hazards of typical transformer oils[J]. *Fire Science and Technology*, 2021, 40(8): 1125-1129.
- [10] 黄青丹, 陈于晴, 刘静, 等. 变压器植物绝缘油燃烧特性的试验研究[J]. *变压器*, 2021, 58(12): 59-63.
HUANG Qingdan, CHEN Yuqing, LIU Jing, et al. Research on combustion characteristics of plant insulating oils for transformer [J]. *Transformer*, 2021, 58(12): 59-63.
- [11] 陈光, 景伟, 王志刚, 等. 火源功率对室内变压器火灾燃烧特性影响研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(7): 186-192.
CHEN Guang, JING Wei, WANG Zhigang, et al. Study on influence of fire source power on combustion characteristics of indoor transformer fire[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(7): 186-192.
- [12] CICIONE A, WALLS R S. Towards a simplified fire dynamic simulator model to analyse fire spread between multiple informal settlement dwellings based on full-scale experiments[J]. *Fire and Materials*, 2021, 45(6): 720-736.
- [13] 邱宁, 王晖. 特高压变电站消防重点与规范问题探讨及改进措施[J]. *变压器*, 2019, 56(8): 19-23.
QIU Ning, WANG Hui. Discussion on fire protection emphasis and codes of UHV substation and improvement measures[J]. *Transformer*, 2019, 56(8): 19-23.
- [14] 张燕, 刘国强, 李国春, 等. 大型变压器泡沫灭火系统灭火试验研究[J]. *消防科学与技术*, 2022, 41(9): 1251-1255.
ZHANG Yan, LIU Guoqiang, LI Guochun, et al. Experimental study on fire extinguishment of foam system on the large transformer[J]. *Fire Science and Technology*, 2022, 41(9): 1251-1255.
- [15] 谢永涛, 袁浩, 李同哈, 等. 特高压换流站消防能力提升措施研究[J]. *高压电器*, 2020, 56(1): 241-245.
XIE Yongtao, YUAN Hao, LI Tonghan, et al. Research on improvement measures of fire protection capacity for UHVDC converter station[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(1): 241-245.
- [16] 刘国强, 李国春, 郝亚楠, 等. 全氟己酮在室内 10 kV 变压器火灾中的灭火试验研究[J]. *消防科学与技术*, 2022, 41(10): 1451-1454.
LIU Guoqiang, LI Guochun, HAO Yanan, et al. Experimental study on fire extinguishing of perfluorohexanone in 10 kV indoor transformer fire[J]. *Fire Science and Technology*, 2022, 41(10): 1451-1454.
- [17] 陈涛, 胡成, 张佳庆, 等. 特高压换流变压器水喷雾灭火系统有效性实验研究[J]. *工业安全与环保*, 2022, 48(1): 5-9.
CHEN Tao, HU Cheng, ZHANG Jiaqing, et al. Experimental research on effectiveness of water spray fire extinguishing system for UHVDC converter transformer[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2022, 48(1): 5-9.
- [18] 张金伟, 许颖, 李栋梁, 等. 基于 BIM-CFD 的变压器防火墙火灾性能化设计[J]. *北京交通大学学报*, 2021, 45(3): 84-92.
ZHANG Jinwei, XU Ying, LI Dongliang, et al. Fire performance design of transformer firewall based on BIM and CFD[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2021, 45(3): 84-92.
- [19] 田珍, 甘露, 张盘玉, 等. 水喷雾特性对特高压站主变压器火灾的影响研究[J]. *给水排水*, 2023, 49(3): 104-110.
TIAN Zhen, GAN Lu, ZHANG Panyu, et al. Study on the influence of water spray extinguishing system on transformer fire[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(3): 104-110.
- [20] 裴蓓, 杨双杰, 陆丁连, 等. 含复合添加剂 N₂-双流体细水雾抑制乙醇火焰强化研究[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(1): 260-267.
PEI Bei, YANG Shuangjie, LU Dinglian, et al. Study on the suppression on the reinforcement of ethanol fire flame by N₂ twin-fluid water mist containing compound additives[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(1): 260-267.
- [21] MERCI B, VAN MAELE K. Numerical simulations of full-scale enclosure fires in a small compartment with natural roof ventilation [J]. *Fire Safety Journal*, 2008, 43(7): 495-511.
- [22] YANG Peizhong, TAN Xun, XIN Wang. Experimental study and numerical simulation for a storehouse fire accident[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(7): 1445-1459.
- [23] 汪亚龙, 黎昌海, 张佳庆, 等. 油浸式变压器火灾事故的特点与灭火对策研究[J]. *安全与环境工程*, 2019, 26(6): 166-171.
WANG Yalong, LI Changhai, ZHANG Jiaqing, et al. Fire accident characteristics and fire extinguishing countermeasures of oil-immersed transformer[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2019, 26(6): 166-171.
- [24] 范明豪. 变电站火灾风险分析与评估[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
FAN Minghao. Fire risk analysis and assessment of transformer substation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.

苏文(1987—),男,硕士,工程师,主要从事电力维护防灾工作。

范明豪(1975—),男,博士,正高级工程师,研究方向为电力防灾救灾(通信作者)(E-mail: mhfansfp@163.com)。