

文章编号: 1671-6612 (2025) 04-517-09

漏油量对地铁牵引变压器火灾蔓延特性影响研究

付 强 毕海权 周远龙 王 菁

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘 要】 地铁列车牵引变压器作为动力系统的核心设备, 关系着列车的消防安全。油浸式变压器因绝缘油泄漏引发的火灾具有蔓延快、危害大的特点, 而油泄漏量是影响火灾行为的关键因素。通过数值模拟的方法, 采用 FDS 建立了牵引变压器和车底设备仓数值计算模型, 研究了不同油泄漏量对设备舱内牵引变压器火灾蔓延特性的影响, 分析了不同油泄漏量下的牵引变压器火灾热释放速率、火灾蔓延过程和设备舱内温度分布。研究结果表明: 随着变压器油泄漏量的增加, 泄漏油积聚在变压器下方形成油池, 火灾燃烧时间和热释放速率最大值均出现明显增长, 油池火对舱内氧气的消耗会抑制设备舱内其余设备的燃烧; 当变压器油泄漏量达到 50% 后, 变压器两侧裙板会烧毁脱落, 且裙板烧毁区域集中在油池附近, 油池两侧位置应重点防护; 油池厚度的增加会降低变压器油的燃烧效率, 裙板的烧毁时间出现延迟。

【关键词】 地铁车辆火灾; 牵引变压器; 油池火; 数值模拟

中图分类号 TU831.4 文献标志码 A

Study on the Influence of Oil Leakage Volume on Fire Spread Characteristics in Subway Train Traction Transformers

Fu Qiang Bi Haiquan Zhou Yuanlong Wang Jing

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 The traction transformer of subway trains, as a core component of the power system, is crucial to the fire safety of the train. Oil-immersed transformers present significant fire hazards characterized by rapid spread and severe consequences due to insulating oil leakage, with the oil leakage volume being a critical factor influencing fire behavior. This study employs numerical simulation methods using Fire Dynamics Simulator (FDS) to establish computational models of the traction transformer and undercarriage equipment compartment, investigating the impact of different oil leakage volumes on fire spread characteristics within the equipment compartment. The analysis focuses on the heat release rate, fire propagation processes, and temperature distribution under varying oil leakage conditions. The results demonstrate that as the leakage volume increases, leaked oil accumulates beneath the transformer to form an oil pool. Both the fire duration and peak heat release rate show significant growth, while the oxygen consumption by the oil pool fire inhibits combustion of other equipment in the compartment. When the oil leakage reaches 50%, the side skirts on both sides of the transformer experience burn-through and detachment. The burn-through areas concentrate near the oil pool, indicating that the zones adjacent to the oil pool require prioritized fire protection. Increased oil pool thickness reduces the combustion efficiency of transformer oil, resulting in delayed burn-through time of the side skirts.

【Keywords】 Subway vehicles fire; Traction transformer; Pool fire; Numerical simulation

作者简介: 付 强 (1999-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 2643131152@qq.com

通讯作者: 毕海权 (1974-), 男, 博士, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2025-02-21

0 引言

随着城市轨道交通的快速发展,我国已成为世界上最大的城市轨道交通市场。然而地铁列车由于运行时间长、承载负荷大等原因而导致其车内设备高温过载的情况也时有发生,因而列车运行的安全性和稳定性越来越受到关注^[1]。在地铁列车电气系统中,牵引系统作为列车的动力源,承担列车牵引与制动的职能。而牵引系统里的牵引变压器作为高压接收端,承担着将接触网高压电降压的任务,面临的风险极高,并且当前列车大多采用油浸式变压器,一旦发生火灾,后果会更为严重。

油浸式牵引变压器是一种电压等级高、能量大、储油量多的充油设备,具有较高的火灾风险。目前国内外对于列车车载牵引变压器火灾的研究还较少,但是对于变电站用大型电力变压器已有一系列研究成果。2009年 Muller 等^[2]通过实验测试表明,当变压器发生电气故障时,它会产生在油中传播的动态压力波。2018年 Guo 等^[3]重点研究了爆炸性气体在不同条件下产生的爆炸压力,采用计算方法,数据分析揭示了变压器室内气体爆炸时的爆炸超压规律。Hu 等^[4]利用 FDS 模拟了变压器火灾燃烧过程,分析了变压器火灾温度和流场数据,建立了基于 unity3d 引擎的火灾可视化系统。2023年 Ma 等^[5]研究了点火能量、油量和点火位置对变压器油爆炸引起的超压积聚和火球行为的影响。Chen 等^[6]在无限条件下进行了实验和模拟并进行了定量爆炸风险评估,揭示了绝缘油的爆炸特性。油浸式变压器起火后会形成油池火、溢油火和流淌火等多种火灾形式,2019年 Zhang 等^[7]通过实验研究了典型变压器油的燃烧过程和火灾特性,重点研究了变压器油类型的影响。Zhao 等^[8]进行了一系列不同口径(0.2-1m)的变压器油池防火试验。测量并分析了质量燃烧速率、火焰高度、液层温度、火焰温度和辐射热通量。Li 等^[9]在钢制实验装置上进行了多次变压器油连续溢油火灾实验,以获得变压器油或与变压器油具有相似性能的燃料的垂直溢油火灾特性。

目前关于变压器火灾以及变压器油燃烧的研究主要集中于大型电力变压器的火灾场景,车载牵引变压器相较于变电站大型电力变压器体型较小、能量低、储油少,并未受到广泛关注。但车载牵引变压器作为列车动力系统的主要设备,直接吊装在

车底,发生火灾后对列车运行可靠性以及人员安全性都具有直接影响,同时变压器油的泄漏程度对变压器火灾是一个关键的影响因素,应该进一步研究。本文旨在通过 FDS 模拟对设备舱内牵引变压器火灾的蔓延特性进行研究,进一步分析不同油泄漏量对牵引变压器火灾蔓延特性的影响,从而对牵引变压器火灾危险性进行分析。

1 模型建立

1.1 计算模型及计算域

以某型号牵引变压器结构建立火灾数值计算模型,变压器主体结构由铁芯、线圈、油箱、输油管、冷却系统等几个部分组成,采用强迫导向油循环风冷的冷却形式。变压器外部安装尺寸约为 2.6m×2.3m×0.8m,包含电动送风机在内总质量约为 2910kg,内部变压器油重 400kg。采用 FDS 程序前处理软件 Pyrosim 建立的牵引变压器结构如图 1 所示。

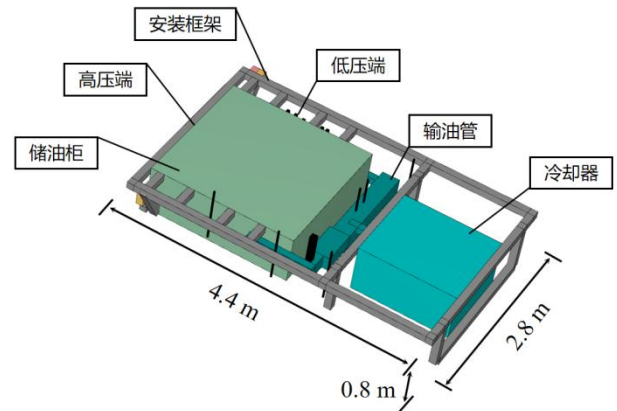


图 1 牵引变压器结构模型

Fig.1 Structural model of traction transformer

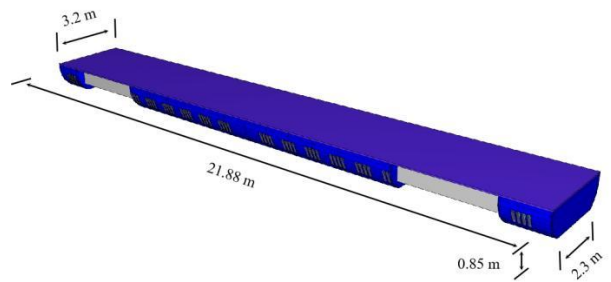


图 2 地铁列车设备舱外形

Fig.2 Exterior of metro train equipment cabin

地铁设备舱外形如图 2 所示,总体呈三段式布置,侧面安装有侧裙板,裙板开设有格栅作为通风

口。设备舱外部长度为 21.88m, 上方为车辆底板, 宽度约为 3.2m, 设备舱下方底板宽度约为 2.3m, 整体高度约为 0.85m。设备舱内起火因素众多, 主要发热设备有牵引变压器、牵引变流器、辅助变流器、连接器等, 且顶板下部布置有电缆槽与各设备连接。将主体设备进行合理简化后, 设备舱模型内部结构如图 3 所示。

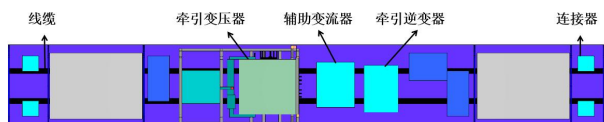


图 3 地铁列车设备舱内部设备布置示意图

Fig.3 Schematic diagram of internal equipment layout in metro train equipment cabin

设备舱内主要可燃物变压器油为液体材料, 而实际液体燃料的燃烧属于蒸发燃烧的范畴^[10], 需考虑到蒸发温度、汽化潜热等热性参数的影响, 因此本文采用热解法对变压器油进行材料属性设置。查阅相关文献, 得到变压器油热性参数如表 1^[11,12]所示。其余固体可燃物如电线电缆、橡胶、尼龙等采用锥形量热仪燃烧测试结果作为火灾计算的输入参数。

表 1 变压器油热性参数

Table 1 Thermal parameters of transformer oil

参数名称	数值
闪点 (闭杯) /°C	138
燃点/°C	153
自燃温度/°C	296
燃烧热/ (kJ/g)	45.1
蒸发热 (kJ/kg)	200
沸点/°C	343
密度/ (kg/m ³)	873

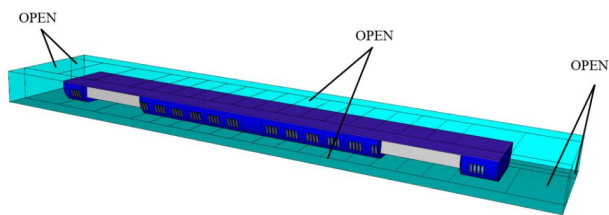


图 4 设备舱数值计算边界条件

Fig.4 Numerical calculation boundary conditions of equipment cabin

研究地铁车辆设备舱内部牵引变压器起火的

工况, 设备舱外界有开阔空间, 因此周围边界采用可以热质交换的 OPEN 边界。环境初始温度为 20°C, 压力值为一个标准大气压。图 4 所示为火灾数值计算模型计算域及边界条件设置。

1.2 电气火源设置

相较于大型油浸式电力变压器, 牵引变压器体积较小, 电压等级较低, 在设计时已充分考虑绕组异常温升带来的安全隐患, 有充分的预防措施, 因此不再考虑变压器主体内部电气故障引起的火灾事故。而通过事故统计^[13]可以发现, 套管以及高压线缆是牵引变压器电气故障相对常见的发生区域, 而根据前人研究^[14], 在电气火灾的引发因素中, 不良连接的重要程度要高于其余因素。因此, 将牵引变压器连接器位置 (套管引出电缆处) 发生的不良连接作为电气火灾的起因进行研究。

不良连接发生后具有多种故障表现形式, 其中发生不良连接后引起连接处发光的现象, 文献中称之为 glowing connection 或 glowing contact^[15]译为发光接触, 是一种典型的电气火灾引火源。因此本文将发光接触作为不良连接引发火灾的引火源进行研究。张晶^[16]通过模拟电气故障实验, 对发光接触的动态变化过程进行了研究, 给出了发光接触时故障点的温度随时间变化的过程, 温度曲线如图 5 所示。

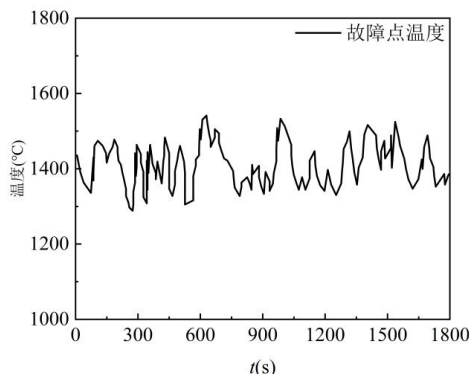


图 5 故障点温度曲线

Fig.5 Temperature curve at fault point

在发光接触引发电气火灾事故中, 可以将故障点对直接接触表面的热传导以及对周围表面的热辐射作为火灾引发条件, 而在 PyroSim 中, 火源可以设置为一个温度随时间变化的表面, 只需将表面温度变化过程与发光接触实验值保持一致, 通过模拟其对周围表面的加热引起起火的过程, 就可以对发光接触引发的电气火灾进行研究。

1.3 网格划分

FDS 中给出了特征直径的计算公式^[17]:

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

式中: D^* 为特征直径, m; Q 为火灾热释放速率, kW; ρ_∞ 为环境密度, kg/m^3 ; T_∞ 为环境温度, K; c_p 为定压比热, kJ/kg ; G 为重力加速度, m/s^2 .

由式(1)可知,火灾热释放速率是影响特征直径的关键参数。特征直径与火灾热释放速率呈正比关系。而根据陈涛^[18]的研究,变压器油热释放速率为 1000kW/m^2 , 而实际变压器中油量为 400kg 左右, 一旦发生泄漏所形成的油池火面积较大, 同时引燃周围可燃物, 火灾热释放速率会迅速增长, 因此选取 $Q=1000\text{kW}$ 计算网格尺寸, 即可满足火灾计算要求, 计算得到特征直径为 0.96m 。

根据以往火灾研究^[19,20], 当计算网格尺寸取在

$0.05D^*-0.15D^*$ 时, 火灾模拟计算结果能较好的吻合火灾实验结果。在车底设备舱内存在电线电缆等细长障碍物, 为避免网格识别出现误差导致计算结果出现偏差, 本文选取网格尺寸为 $0.05D^*$, 全部网格为正方体, 网格尺寸为 0.04m 。

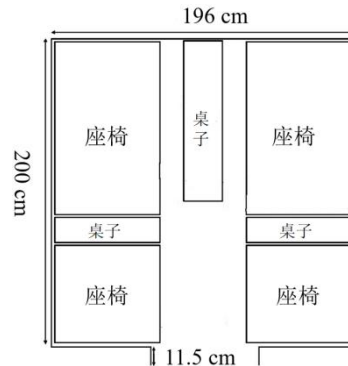
1.4 数值计算方法验证

1.4.1 模拟概况

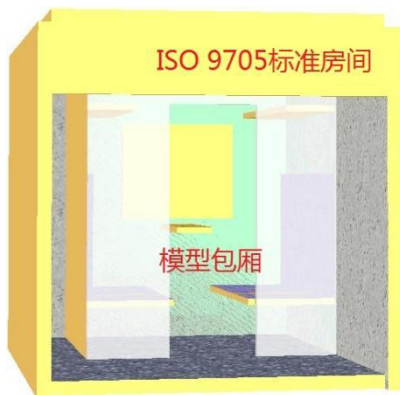
本研究基于瑞典 SP 机构开展的列车车厢全尺寸火灾实验数据^[21]进行数值模型验证。图 6 (a)、图 6 (b) 分别展示了实验舱体及列车包厢原型平面结构参数。实验所涉材料的热释放速率参数通过锥形量热仪测定, 具体数据参见原始文献。图 6 (c)、图 6 (d) 呈现了基于 FDS 平台构建的数值仿真模型。建模严格遵循实验参数, 同步建立 ISO 9705 标准燃烧室与实验舱体三维模型。数值计算设定初始环境温度为 23°C , 底部边界采用 Inert 边界, 其余边界均设置为大气压力边界, 总模拟时长设定为 240s 。



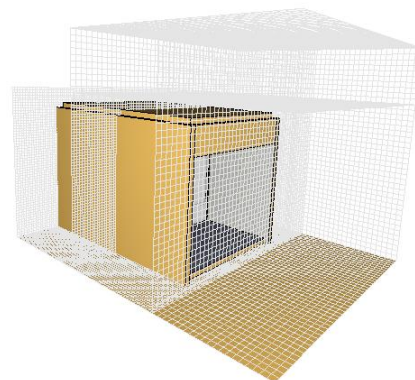
(a) 包厢火灾实验装置



(b) 包厢平面布局示意图



(c) 模型



(d) 计算区域

图 6 包厢燃烧实验装置以及数值计算模型

Fig.6 Compartment fire experimental apparatus and numerical simulation model

1.4.2 验证结果

图 7 为 FDS 模拟热释放速率曲线与实验测量

值的对比。数值计算结果在增长阶段与实验数据演化趋势具有较高吻合度, 证明本文建模方法具备火

灾发展过程的有效模拟能力。需说明的是, 120s 前数据偏差主要源于 FDS 对聚氨酯泡沫等热塑性材料熔融燃烧过程的模拟精度限制。

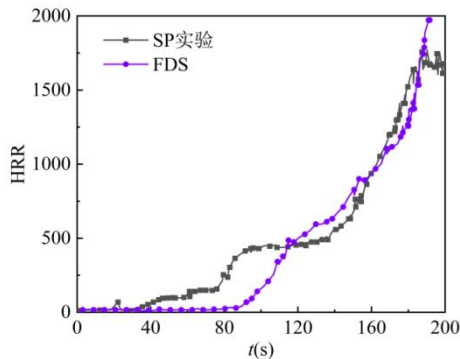


图 7 数值计算方法验证结果

Fig.7 Validation Results of Numerical Methods

2 不同油泄漏量下牵引变压器电气火灾蔓延特性分析

2.1 工况设置

实际变压器油泄漏后, 积聚在设备舱底板表面位置, 若无引流装置, 变压器油会在设备舱底板形成油池, 而变压器油在发生泄漏时, 在变压器表面同时形成油膜, 这两种形式点燃后分别形成油池火与流淌火。因此, 对变压器火灾进行研究时, 在变压器底部设置油池火, 由于变压器安装时存在有固定横梁, 油池面积与变压器底部固定横梁和侧裙板围成的方形面积一致, 设置为 $2.6\text{m} \times 2.3\text{m}$, 油池厚度在确定变压器油泄漏量后计算得到。考虑到油管渗漏, 在变压器表面以及油管表面设置流淌火。电气故障发生位置以及油池设置如图 8 所示。

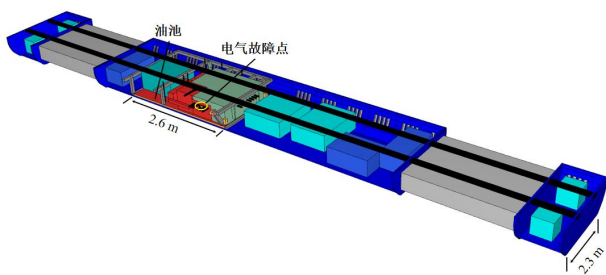


图 8 模型设置示意图

Fig.8 Schematic diagram of model setup

本文模拟计算的变压器型号含有 400kg 变压器油, 按比例设置泄漏情况如下:

(1) 变压器油泄漏 0%: 变压器油储存在油箱内部并未发生大量泄漏, 变压器表面与油管表面存

在少量渗漏的变压器油;

(2) 变压器油泄漏 25%、50%、75%: 由于箱内变压器油受热分解产生气体, 产生膨胀力, 变压器主体喷油, 泄漏油在底部形成一定厚度的油池, 剩余油在油箱内部;

(3) 变压器油泄漏 100%: 考虑油箱结构失效的最不利工况。

综合考虑以上影响因素后, 列出牵引变压器不同变压器油泄漏量的计算工况如表 2 所示。

表 2 不同变压器油泄漏量计算工况

Table 2 Calculation conditions for different transformer oil leakage amounts

工况	故障类型	故障位置	变压器油泄漏量
1			0%
2			25%
3	发光接触	连接器处	50%
4			75%
5			100%

2.2 结果分析

2.2.1 热释放速率

图 9 所示为不同油泄漏量下, 连接器处发光接触引发火灾的热释放速率变化规律。火灾初期(前 80s)各泄漏量工况发展过程基本一致: 发光接触点高温导致绝缘劣化, 引发变压器油泄漏并汽化, 15s 时引燃电缆形成明火, 随后油蒸气爆燃使热释放速率在 50s 达到峰值 3.5MW。随着氧气与可燃气体消耗, 热释放速率逐渐下降至 150s 的 200kW。此时舱内残存热量引燃其他电气设备(如牵引变流器), 导致 375s 时热释放速率二次升高至 600kW, 最终随可燃物耗尽而衰减。

当油泄漏量增至 25% 时, 底部油池较薄, 燃烧强度受限, 未引燃侧裙板, 但其持续燃烧延长了对邻近设备的加热时间。泄漏量达 50% 时, 油池增厚导致侧裙板受热时间延长, 680s 起裙板分阶段脱落(680s、740s、880s、920s), 油池暴露面积逐次扩大, 空气补充使热释放速率在 970s 达到 4.1MW, 于 1140s 攀升至 4.4MW。泄漏量增至 75% 后, 裙板脱落时序(680s、760s、1020s、1100s)与 50% 工况相似, 但油池厚度增加使第二阶段燃烧强度显著提升(780s 达 4.1MW), 最终峰值升至 4.5MW。全泄漏工况(100%)因油池过厚导致燃烧效率下降, 首块裙板脱落延迟至 810s, 但后续裙板脱落

(890s、1190s、1280s)使油池大面积暴露,1200s时热释放速率达到最大值 5.4MW。

结合以上数据可以发现,油池厚度与燃烧效率存在一定的拮抗效应,油池厚度增加虽延长燃烧时间,但降低了燃烧效率,导致裙板受热脱落延迟。而泄漏量与火灾强度呈正相关的关系,泄漏量增大显著提升了热释放速率峰值并延长燃烧总时长。裙板脱落会引发火灾燃烧强度二次增长,其强度受油池暴露面积与残余燃料量共同制约。

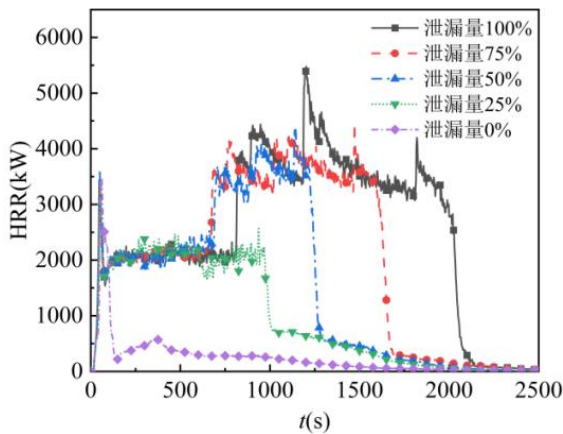


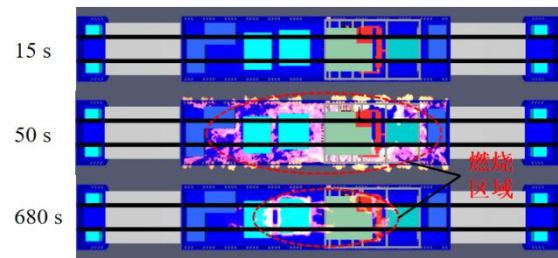
图9 不同油泄漏量下牵引变压器火灾热释放速率曲线图
Fig.9 Heat release rate curves of traction transformer fire under different oil amounts

2.2.2 火灾蔓延过程

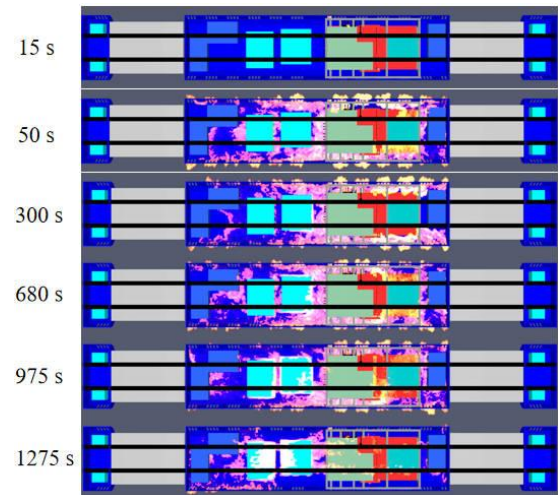
图 10 所示为不同变压器油泄漏量对牵引变压器火灾蔓延过程的差异化影响。图 10 (a) 显示出在零泄漏工况下 (0%), 仅有油管表面及变压器顶部/侧面的薄油层参与汽化燃烧, 底部未形成油池。可燃气体在 50s 左右发生爆燃后迅速耗尽, 残余薄油层维持局部燃烧但未扩展。电器材料等固体可燃物被加热后迅速达到燃点, 由于固体可燃物火灾蔓延速度较慢, 设备舱内消耗的氧气得到及时补充, 固体可燃物得以充分燃烧。图 10 (b) 中可以看出, 泄漏量达到 25%后形成油池, 持续提供燃料, 变压器油燃烧时间显著延长至 975s。通风格栅引导火焰向通风区域集中, 油池边缘火焰逐步向中心扩展, 同时油池的持续燃烧消耗舱内氧气, 使得设备舱内其余固体可燃物燃烧时间延后。

当泄漏量达到 50%后, 观察图 10 (c)、图 10 (d) 以及图 10 (e) 可以看出, 火灾热量使裙板熔毁脱落, 烧毁时间呈现非线性延迟 (50%/75%泄漏约 680s, 完全泄漏 810s), 归因于油层增厚导

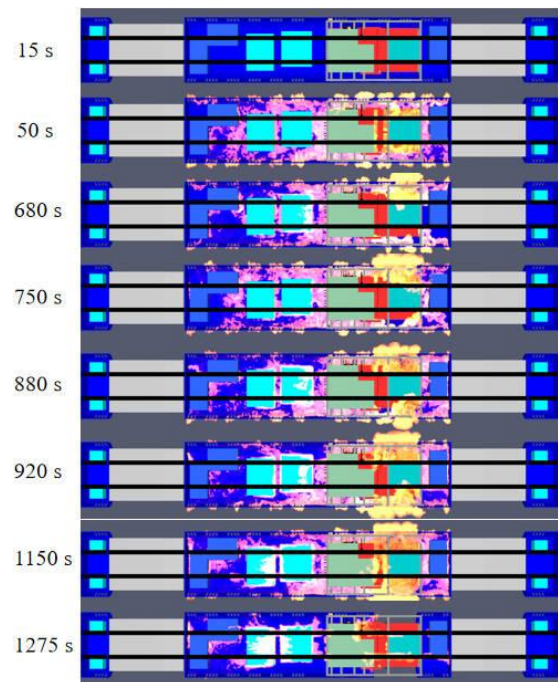
致的燃烧效率下降。同时可以发现, 裙板脱落会加剧局部燃烧强度, 暴露区域形成高燃烧强度区, 最终导致油池两侧裙板完全损毁。



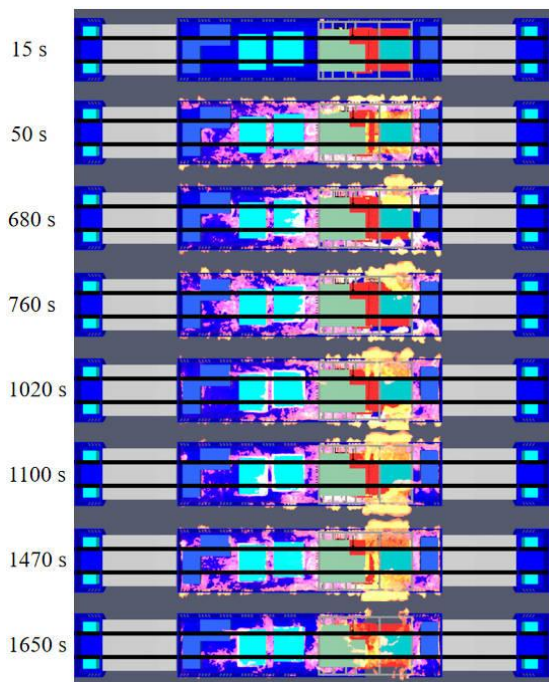
(a) 泄漏量 0%



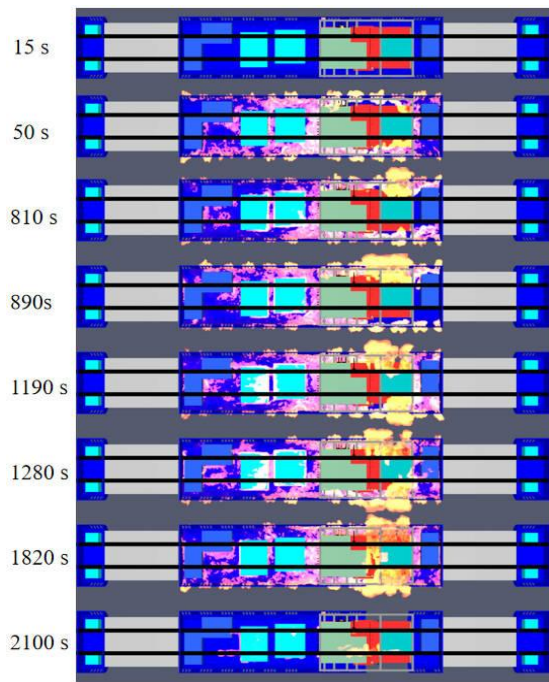
(b) 泄漏量 25%



(c) 泄漏量 50%



(d) 泄漏量 75%



(e) 泄漏量 100%

图 10 设备舱内牵引变压器火灾蔓延过程

Fig.10 Fire spread process of traction transformer in equipment cabin

2.2.3 设备舱内顶板温度分布

为观察不同时刻下设备舱内顶板温度分布情况, 将温度测点沿设备舱中心线布置, 其坐标如图

11 所示。

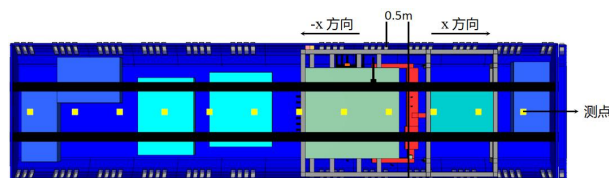


图 11 设备舱内温度测点布置示意图

Fig.11 Schematic diagram of temperature measurement points layout in equipment cabin

从图 12 (a) 可以看出, 680s 时, 泄漏量 0% 的火灾燃烧区域转移至 $x=-4.5\text{m}$ 位置处, 此时由于变压器油已经基本耗尽, 进入舱内的空气加剧了牵引变流器的燃烧, 温度达到 770°C 左右。其余工况变压器油池暴露面持续提供可燃气体, 在牵引变压器周边持续燃烧, 使得火灾燃烧区域基本集中在 $x=-3.5$ 、 $x=1.5$ 位置处, 其中泄漏量达到 50% 以及 75% 时, 变压器一侧裙板烧毁使得燃烧加剧, $x>-1.5$ 区域温度明显高于其余工况, 不同工况温差最大约为 260°C 。810s 时油泄漏量 0% 的工况火灾蔓延至辅助变流器, 使得高温区域出现扩展, 此时泄漏量 50% 以及 75% 的工况裙板进一步烧毁, 燃烧强度进一步加强, 油池位置工况间温差最大达到约 320°C 。从图 12 (b) 中还可明显看出随着泄漏量的增加, $x=-3.5$ 位置处温度随油池厚度出现明显的阶梯变化, 分析其原因在于油池厚度的增加降低了变压器油的燃烧效率, 这与前人研究保持一致^[12]。

火灾发展至 930s, 泄漏量超过 50% 的工况裙板均出现烧毁或者烧毁区域进一步扩大, 进入的空气加剧了油池火的燃烧, 同时向牵引变流器提供了空气使其能够充分燃烧, 设备舱内温度均出现明显升高。1150 s 时泄漏量 0% 的工况牵引变压器表面油层燃烧殆尽, 舱内温度出现明显下降, 其余工况由于裙板被烧毁, 进入的空气使得牵引变流器充分燃烧, $x=-4.5$ 位置处温度均达到 1000°C 左右。此时 25% 泄漏量油池消耗殆尽, 因此油池区域温度明显低于其余工况, 高温区域主要集中在牵引变流器处, 且此处温度明显高于其余工况。而 50% 泄漏量工况裙板烧毁区域最大, 与外界气体交换更充分, 燃烧更为剧烈, $x>-1.5$ 区域温度明显高于其余工况。

观察图 12 (e) 可以发现 1470s 时 75% 泄漏量工况油池区域温度显著高于其余工况, 结合火灾蔓

延过程以及火灾热释放速率可以发现,此时 75%泄漏量工况的火焰覆盖了整个油池,燃烧效率进一步提升,因此 $x > -1.5$ 区域温度明显升高,但油池火的剧烈燃烧消耗了大量氧气,使得设备舱内空气不足,牵引变流器不能充分燃烧,此处温度低于其余

工况。而此时 25%、50%泄漏量油池消耗殆尽,油池区域温度出现明显降低。1820s 时变压器油完全泄漏的工况火焰完全覆盖油池,燃烧强度加剧,油池上方温度出现明显提升,而其余工况油池基本燃尽,设备舱内温度逐渐降低。

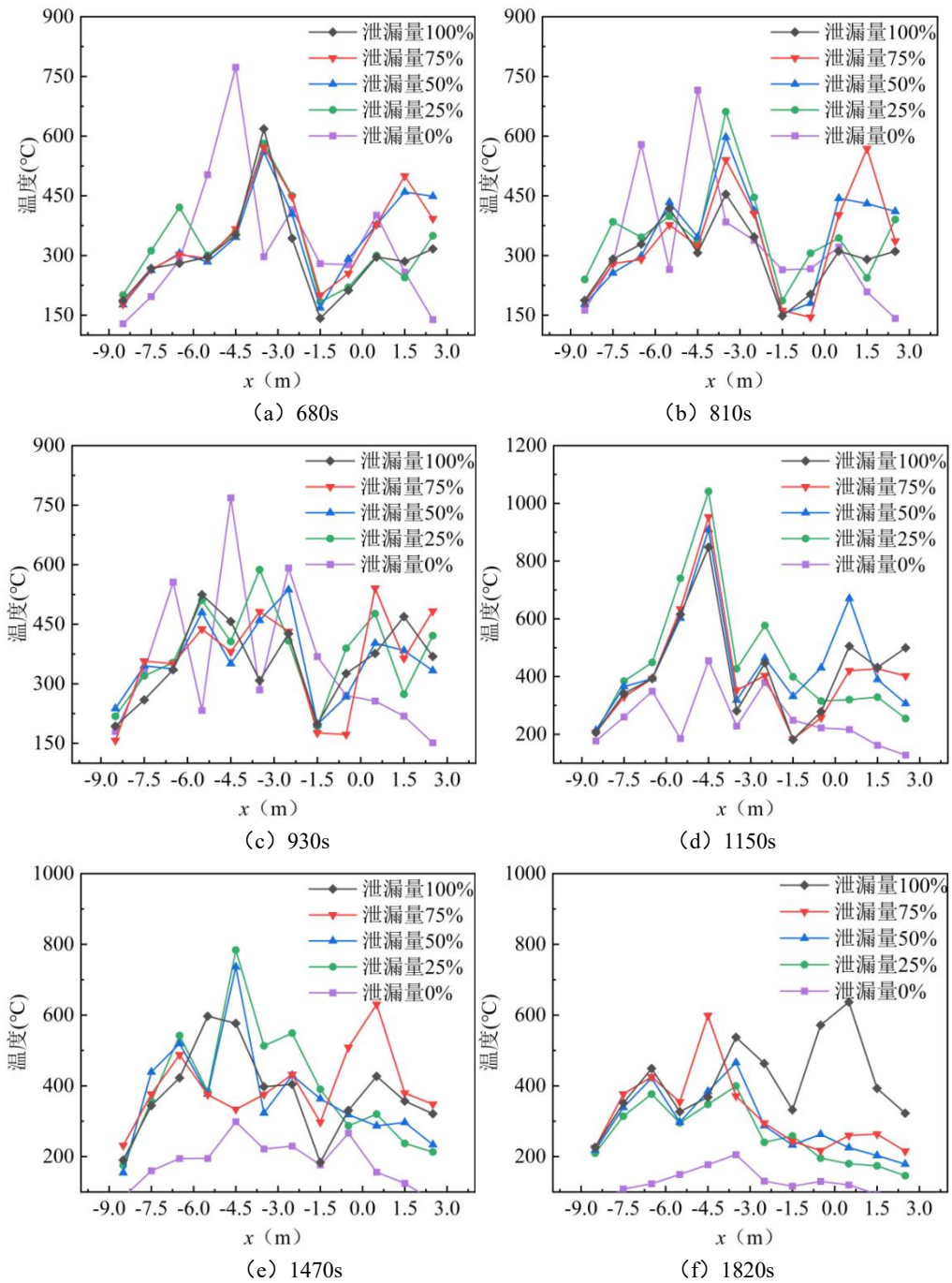


图 12 设备舱内顶板温度分布

Fig.12 Temperature distribution on the ceiling of equipment cabin

3 结论

通过对不同油泄漏量下地铁列车牵引变压器火灾蔓延特性进行分析, 可以得出以下结论:

(1) 牵引变压器油池火灾初期均在约 50 s 时发生爆燃现象并达到首个热释放速率峰值 (3.5MW)。该阶段产生的热冲击可能导致设备舱裙板结构失效, 形成开放燃烧环境进而加剧火势, 故建议强化设备舱结构强度以延缓开放状态形成。研究表明, 油泄漏量增加显著影响火灾持续时间与热释放速率最大值: 完全泄漏工况下, 火灾发展至 1200s 时达到最大热释放速率 5.4MW, 较初始峰值提升 54.3%。据此可知, 火灾初期实施变压器油引流处理可有效缩短燃烧时间并控制最大热释放速率 (降幅达 35.2%), 从而显著降低火灾危害性。

(2) 当泄漏油积聚成油池时, 牵引变压器火灾燃烧区域主要集中在油池附近, 油池火对舱内氧气的消耗会阻碍设备舱内其余电气设备的充分燃烧; 牵引变压器油池火灾持续的加热作用会烧毁侧裙板, 贴近变压器的侧裙板受到影响最为严重, 应重点防护, 避免裙板烧毁形成开放环境, 加剧火灾燃烧强度。

(3) 结合火灾热释放速率、裙板破裂时间以及设备舱内温度分布情况可以发现, 当油泄漏量达到一定程度使牵引变压器底部出现油池时, 油池厚度的增加会降低变压器油的燃烧效率, 使得火灾发展阶段放热量减少, 舱内温度降低, 裙板烧毁时间出现延后。

本文针对不同油泄漏量下的牵引变压器火灾进行了研究, 但实际火灾情况下, 变压器油泄漏量可能会随着火灾的发展逐渐增多, 后续可以深入研究这种动态变化过程对火灾发展的影响。同时, 列车运行工况下气流环境对设备舱内部火灾的影响也并未纳入考虑, 需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 翁星方. 城轨车辆牵引逆变器的研究与开发[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [2] Sebastien Muller, Margareta Petrovan Boiarciuc, Guillaume Perigaud. Protection of oil-filled transformer against explosion: Numerical simulations on a 200 MVA transformer[C]. 2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, Romania, 2009:1-8.
- [3] Guo ZH W, Guo X J, Liu X L, et al. Study on Decomposition Gas Explosion of Transformer Oil Under Arc[C]. 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2018:1-5.
- [4] Hu Y SH, Yan B, Li Y, et al. Full scale experimental and numerical simulation of outside transformer fire[J]. Journal of Physics: Conference Series. 2022:2387(1).
- [5] Ma H SH, Liu ZH Y, Li Y, et al. Effects of ignition energy, oil volume and ignition position on transformer oil explosions[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023,(176):346-356.
- [6] Chen G L, Xu Q M, Song X ZH, et al. The explosion characteristics of the insulating oil under unconfined conditions and its damage assessment[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023,(52):103777.
- [7] Zhang B S, Zhang J Q, Yong H, et al. Burning process and fire characteristics of transformer oil: A study focusing on the effects of oil type[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020,(139):1839-1848.
- [8] Zhao J L, Wang S S, Zhang J P, et al. Experimental Study on the Burning Characteristics of Transformer Oil Pool Fires[J]. Energy Fuels. 2020,34(4):4967-4976.
- [9] Li L Y, Zhai X, Wang J C, et al. Experimental study on vertical spill fire characteristics of transformer oil under continuous spill condition[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021,156:521-530.
- [10] 代尚沛. 低压环境下典型液体燃料蒸发特性及燃烧特性研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2024.
- [11] 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.
- [12] 杨娴, 从伟, 汪书苹, 等. 不同燃料液面深度的变压器套管油池火燃烧特性数值模拟[J]. 消防科学与技术, 2021,40(12):1723-1727.
- [13] 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.
- [14] Babrauskas, Vytenis. Research on electrical fires: The state of the art[J]. Fire Safety Science, 2008, 9(6):3-18.
- [15] WANG QJ, CHUNG Y W. Encyclopedia of tribology[M]. Boston, USA:Springer, 2013.