

城市轨道交通变电站主变压器室火灾顶棚下方 烟气温度特性数值分析*

甘露¹ 王浩² 杨浩然³ 徐琳³

(1. 山东国电投能源营销有限公司, 250002, 济南; 2. 山东电力工程咨询院有限公司, 250013, 济南;
3. 山东建筑大学热能工程学院, 250101, 济南)

摘要 [目的] 随着地铁用电负荷的增大, 湿式变压器等油浸式设备在过载情况下工作极易引起火灾, 威胁顶棚结构安全。为了避免或降低变压器发生火灾的可能性, 有必要研究火灾发生时, 主变压器室内烟气的运动规律及顶棚温度的变化特性。[方法] 以济南轨道交通3号线110 kV齐川变电站为例, 通过理论分析和数值模拟, 考虑通风条件、火灾热释放速率和火源高度等多变量的综合影响, 对主变压器室发生火灾时, 顶棚下的烟气温度特性进行研究。[结果及结论] 机械通风开启时, 室内气流组织会影响顶棚的烟气温度分布, 补风导致火羽流倾斜, 使最高温升点向排风口偏移, 最高温升略低于机械通风关闭的情况。顶棚无量纲最高温升可分为两个区域: 火焰未撞击顶棚时, 无量纲最高温升同 $Q^{2/5}$ 与 $(h_{ef} - h_0)$ (Q 为火灾热释放速率; h_{ef} 为火源表面到顶棚的距离; h_0 为虚点源高度) 的比值呈线性关系; 火焰冲撞顶棚时, 无量纲最高温升为常数, 建立顶棚无量纲最高温升预测模型; 基于模拟数据, 提出弱火羽流驱动和强火羽流驱动时的顶棚射流温度衰减预测模型。

关键词 城市轨道交通; 变电站; 顶棚烟气温度

中图分类号 U231.96

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.036

Numerical Analysis of Smoke Temperature Characteristics below the Fire Ceiling in Main Transformer Room of Urban Rail Transit Substation

GAN Lu¹, WANG Hao², YANG Haoran³, XU Lin³

(1. State Power Investment Corporation Shandong Energy Marketing Co., Ltd., 250002, Jinan, China; 2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institution Co., Ltd., 250013, Jinan, China; 3. School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, 250101, Jinan, China)

Abstract [Objective] With the increasing power supply load required by metro, the operation of oil-immersed equipment such as wet-type transformers under overload conditions

is extremely prone to fire, posing a threat to the safety of ceiling structure. To avoid or reduce the possibility of transformer fires, it is necessary to investigate the smoke movement patterns and the variation characteristics of ceiling temperature in main transformer room during fire. [Method] Taking the 110 kV Qichuan Substation of Jinan Rail Transit Line 3 as example, through theoretical analysis and numerical simulation, considering the comprehensive effects of ventilation conditions, fire heat release rate, and fire source height, the temperature characteristics of smoke below the ceiling in main transformer room during fire are investigated. [Result & Conclusion] When mechanical ventilation is activated, the organization of indoor airflow will affect the distribution of smoke temperature below the ceiling. Wind replenishment causes the fire plume to deflect, leading to the maximum temperature rise point shifting towards exhaust vents, with the maximum temperature rise slightly lower than when mechanical ventilation is closed. The dimensionless maximum ceiling temperature rise can be divided into two regions: when the flame does not impinge on the ceiling, it exhibits a linear relationship between the dimensionless maximum temperature rise and the ratio of $Q^{2/5}$ and $(h_{ef} - h_0)$ (where Q is the fire heat release rate, h_{ef} is the distance from fire source surface to the ceiling, h_0 is the virtual point source height); when the fire flame impinges on the ceiling, the dimensionless maximum temperature rise is a constant, and a prediction model for the dimensionless maximum temperature rise of the ceiling is proposed. Based on simulation data, prediction models for temperature decrease of ceiling jets driven by weak and strong fire plumes are proposed.

Key words urban rail transit; substation; ceiling smoke temperature

作为地铁系统的动力核心,城市轨道交通配套变电站能为轨道交通设施的正常运行保驾护航。

* 山东省自然科学基金面上项目(ZR2021ME200);山东电力工程咨询院有限公司科技项目(37-2021-34-K0006)

随着用电负荷的增大,湿式变压器等油浸式设备在过载情况下工作极易引起火灾,进而造成电力传输的中断,影响地铁系统的正常运营,带来巨大的经济损失。已有学者对相关内容进行了研究,但其主要关注变压器油的燃烧特性,包括变压器油燃烧速率、CO 生成速率、热辐射通量、火焰特性等^[1-2],鲜有关主变压器室顶棚下方烟气扩散特性及其影响因素。事实上,室内着火点高度、火灾热释放速率 Q 、灭火系统及通风系统的运行状态都将对烟气扩散特性产生直接的影响。

基于此,本文采用 FDS(火灾动力学模拟器)数值模拟方法,研究主变压器室火灾顶棚的烟气温度特性。为了综合评估火灾安全性,考虑最不利工况——气体灭火系统未正常开启、消防联动设施失效(造成通风系统非正常开启),设计了多种火灾场景。针对不同通风条件(通风系统关闭或非正常开启)、火源高度、火灾热释放速率等因素,重点分析顶棚下方烟气最高温升、顶棚温度衰减特性,提出适用于实际工程的顶棚温度预测模型,为火灾发生后顶棚的烟气温度分布提供边界条件。本文研究可对主变压器室通风设计提供指导意义。

1 工程概况

济南轨道交通 3 号线(以下简称“3 号线”)一期工程线路南端始于龙洞站,途经奥体西路、工业北路、济南东站等,北端终于滩头站,纵贯济南东部新城。3 号线设有两座地下变电站,其中齐川变电站位于济南奥体西路与经十路交界口东北角处。变电站采用地下三层、地上一层的建筑布局,安装主变容量为 2×50 MVA,电压等级为 110/35 kV。齐川变电站为 3 号线一期工程的正常运营提供了有力的供电保障。

2 FDS 数值模拟

FDS 是一款由美国国家标准技术研究院开发的火灾数值模拟软件,已被广泛应用于火灾烟气流动的相关研究,其模拟结果的可靠性已被大量研究证实^[3-4]。本文基于大涡模拟,采用 FDS(软件版本 6.7.1)对齐川变电站变压器室火灾顶棚温度分布特性进行模拟研究。

2.1 模型建立与边界条件

以齐川变电站主变压器室为原型进行物理建模,主变压器室的尺寸为 12.0 m (长) \times 10.0 m

(宽) \times 9.6 m (高),是一个典型的高大空间。主变压器室模型如图 1 所示。在左侧墙面高 6 m 处均匀布置了 3 个机械排风口($2.0\text{ m} \times 0.8\text{ m}$),在右侧墙面布置了 12 个自然进风口($0.6\text{ m} \times 0.8\text{ m}$),通过进风竖井(3.2 m (长) \times 7.0 m (宽) \times 9.6 m (高))与大气连通。房间设有两扇门与走廊相通。变压器室侧壁、顶棚和地板材料为 0.2 m 厚的混凝土。

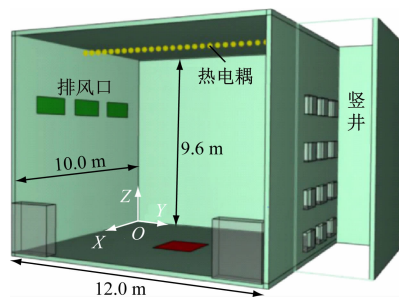


图 1 主变压器室模型

Fig. 1 Model of main transformer room

火源位于房间中部,尺寸为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$,以庚烷为燃料,火源高度 h (着火位置与地面的垂直距离)为 0.1 m 、 2 m 、 3 m 、 4 m 、 5 m 、 6 m ,火灾热释放速率 Q 为 5 MW 和 10 MW ^[5]。燃烧模型采用简单化学模型,产烟量为 0.1 g/g 。本次模拟考虑消防联动设施失效和正常工作两种火灾场景。当消防联动设施失效时,机械通风系统未正常关闭;当消防联动设施正常工作时,所有风口在发生火灾后自动关闭。在机械通风开启状态下,左侧墙面排风口开启,总排风量以 12 次/h 的换气次数确定。右侧墙面上的进风口开启,与进风竖井相通,无初始风速。模拟工况的详细参数如表 1 所示。环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境大气压为标准大气压。此外,为探测顶棚附近的烟气温度,顶棚下方 0.2 m 处设置了一排热电偶,相邻热电偶间隔为 0.2 m (见图 1)。

表 1 模拟工况的详细参数

Tab. 1 Detailed parameters of simulation working conditions

工况编号	Q/MW	通风条件	火源高度/ m
1~7	5	机械通风关闭	0.1、2、3、4、5、6
8~14	10	机械通风关闭	0.1、2、3、4、5、6
15~21	5	机械通风开启	0.1、2、3、4、5、6
22~28	10	机械通风开启	0.1、2、3、4、5、6

2.2 网格无关性分析

模拟结果的准确性受网格尺寸的影响较大。

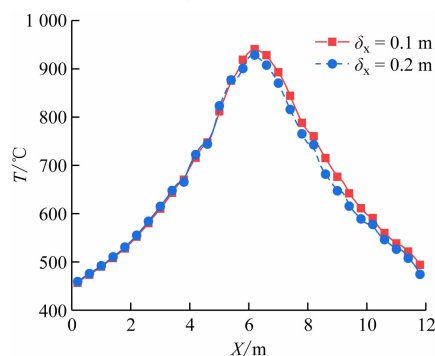
FDS 用户手册推荐 $D^*/\delta_x = 4 \sim 16$ (D^* 为火源特性直径; δ_x 为网格尺寸), 即 δ_x 的取值范围为 $0.0625D^* \sim 0.250D^*$ 。文献[6]的研究结果表明, 当 $\delta_x = 0.10D^* \sim 0.12D^*$ 时, 也可获得较好的模拟结果。根据火灾热释放速率范围, 取 D^* 为 1.8 m 和 2.4 m, 这意味着当 $\delta_x = 0.2$ m 时, 在理论上即可满足模拟的精度要求。为验证本文所选取的网格尺寸是可行的, 选取 $\delta_x = 0.1$ m 的细化网格和 $\delta_x = 0.2$ m 的网格进行对比分析。以工况 6 为例, 两种网格尺寸下的顶棚温度 T 对比如图 2 所示。由图 2 可知, 网格加密后, 顶棚温度预测结果并没有明显提升, 二者的预测结果差异很小。因此, 为了节省计算时间, 网格尺寸最终确定为 0.2 m。

3 模拟结果与分析

3.1 烟气运动规律及准稳态参数

当火源热释放速率为 5 MW、火源高度为 0 时,

不同通风条件及模拟时间 t 下的烟气运动图如图 3 所示。由图 3 可知: ① 在火灾发生的初始阶段, 火羽流垂直上升。② 在 $t = 35$ s、机械通风系统开启工况下, 火羽流开始向排烟口方向倾斜; 当 $t = 130$ s 时, 烟气状态基本稳定, 火羽流向排烟口方向倾斜明



注: X 为距离排烟口墙壁的水平距离。

图2 两种网格尺寸的顶棚温度对比(工况 6)

Fig.2 Comparison of ceiling temperatures between two grid sizes (working condition 6)

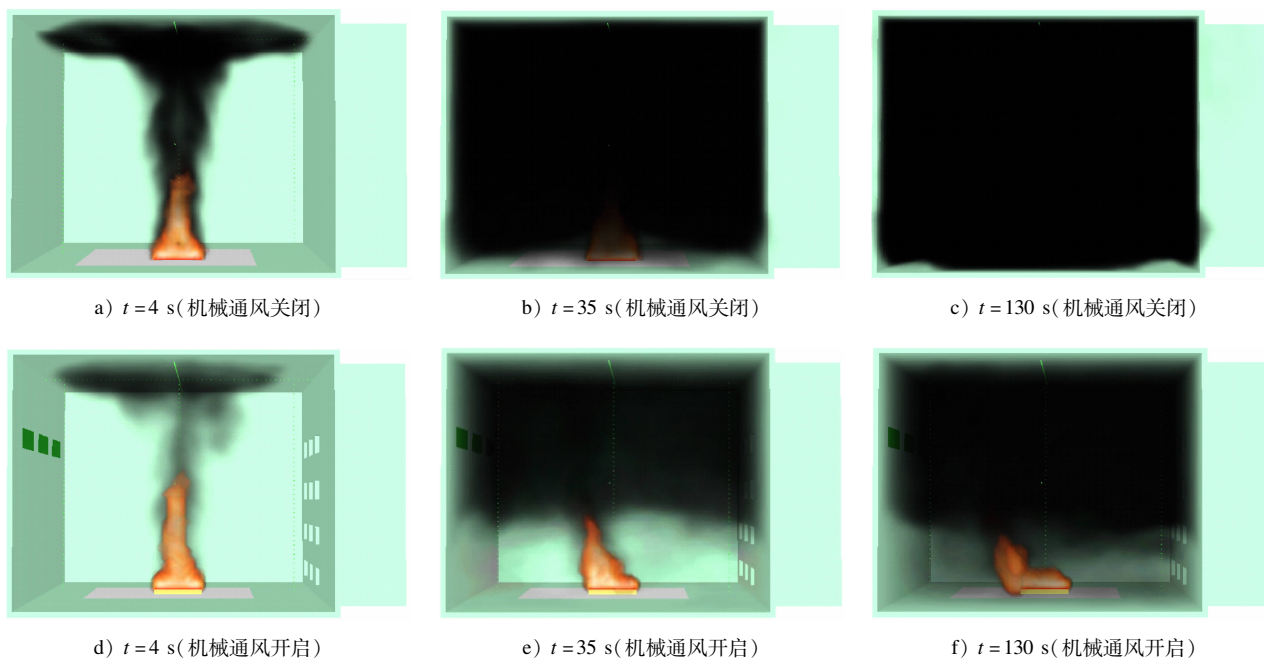


图3 不同通风条件及模拟时间下的烟气运动图($Q = 5$ MW)

Fig.3 Smoke movement nephogram under different ventilation and simulation duration conditions ($Q = 5$ MW)

显, 烟气充满了房间的中上部空间。③机械通风系统关闭工况下, 火源很快淹没在浓烟中。

设置火源热释放速率为 5 MW, 在不同通风条件下, 模拟各火源高度的火灾热释放速率随时间的变化情况, 如图 4 所示。由图 4 可知: 在机械通风开启工况下, 热释放速率在极短时间内达到准稳态; 在机械通风关闭工况且 h 小于 3 m 时, 热释放速率仍能保持

稳定; 当 h 大于 4 m 时, 后期热释放速率出现震荡情况。这表明随着烟气沉降, 火源的燃烧环境被污染, 火灾燃烧由“燃料控制型”向“通风控制型”转变^[7]。基于此, 对于机械排风系统开启、关闭工况, 分别取模拟时间最后 30 s、震荡前 20 s 作为准稳态阶段, 并将准稳态阶段的烟气温度均值用于后续数据分析。

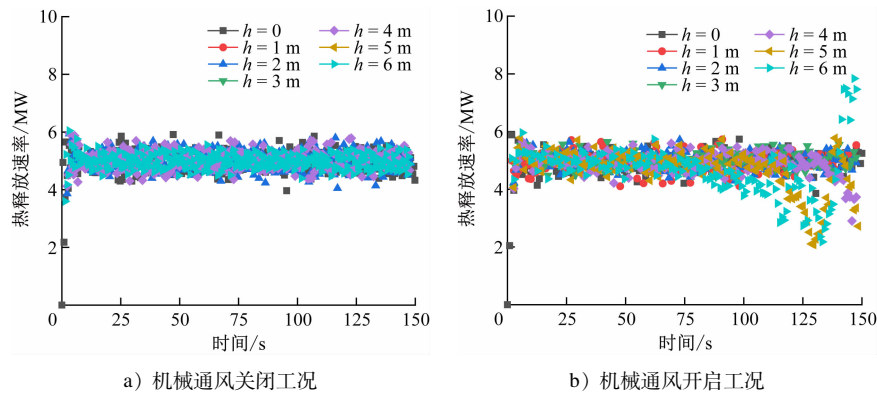


图4 不同通风条件下各火源高度的火灾热释放速率随时间的变化情况 ($Q=5\text{ MW}$)

Fig. 4 Fire heat release rate changing over time at each fire source height under different ventilation conditions ($Q=5\text{ MW}$)

3.2 温度分布规律

准稳态时,不同通风条件及火源高度条件下的主变压器室横向剖面温度分布云图如图5所示。由图5可知:机械通风系统开启和关闭,以及火源高度会显著影响主变压器室内的整体温度分布;随着火源高度

的增加,主变压器室火源上部空间温度逐渐上升,室内出现明显的温度分层现象;当火源高度相同时,机械通风开启工况比关闭工况的室内上部空间温度低 $50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,且下部空间温度更低。

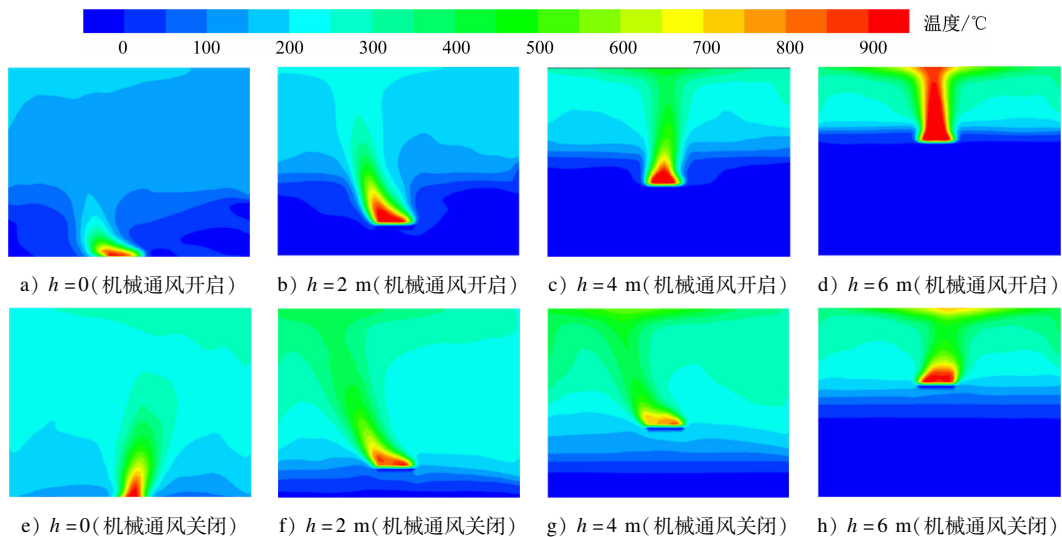


图5 准稳态时不同通风条件及火源高度条件下的主变压器室横向剖面温度分布云图

Fig. 5 Temperature distribution nephogram of main transformer room cross-section at quasi-steady state under different ventilation and fire source height conditions

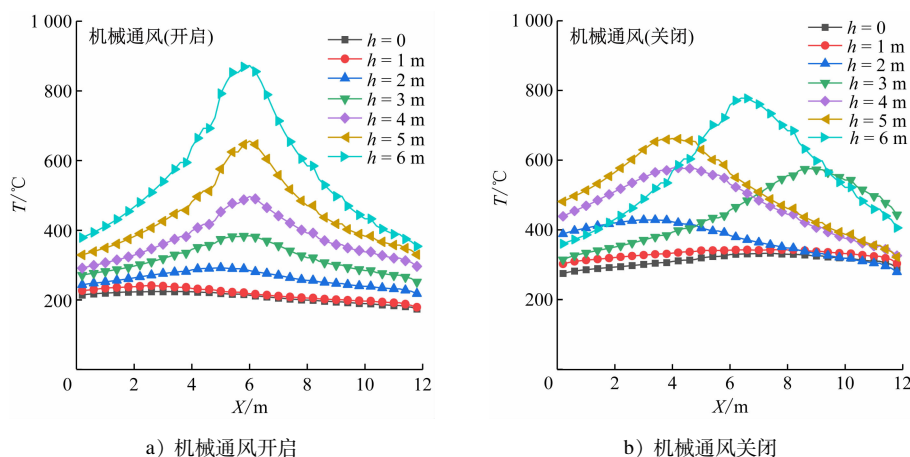
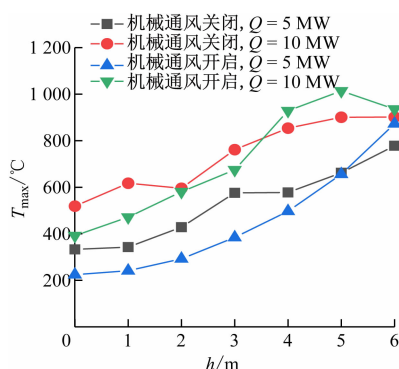
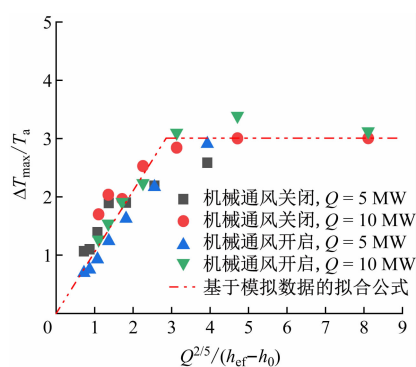
当火灾热释放速率为 5 MW 时,不同 h 下顶棚烟气的 T 分布情况如图6所示。由图6可知:顶棚烟气温度随着 h 的升高而上升;在机械通风系统开启工况下,当 h 大于 3 m 时,顶棚最高烟气温度出现在火源正上方;当 $h=0,1\text{ m}$ 时,顶棚最高烟气温度位置发生偏移。对于机械通风关闭工况,最高烟气温度的出现位置不规律,这与两个开启门的不等量补风或燃烧环境被污染后火焰不稳定有关。

3.3 顶棚下的最高烟气升温

不同通风条件及火灾热释放速率条件下,顶棚最

高烟气温度 T_{\max} 随 h 的变化情况如图7所示。由图7可知: T_{\max} 随着 h 的增加而增加;当 $Q=10\text{ MW}$ 时, T_{\max} 增长到 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,不再继续增加。这是因为此时火焰已经触及顶棚,热电偶检测到的是火焰温度。此外,当 Q 相同时,开启机械通风能在一定程度上降低 T_{\max} ,但整体影响不显著。

为计算隧道顶棚最高烟气升温,文献[8]将顶棚最高烟气升温分为两个区域:① 区域I——烟气冲撞顶棚,顶棚最高烟气升温与 $Q^{2/3}/h_{\text{ef}}$ (h_{ef} 为火源表面到顶棚的距离,单位 m) 线性相关;② 区域

图6 不同 h 下顶棚烟气的 T 分布情况($Q=5$ MW)Fig.6 Ceiling smoke T distribution under different h conditions ($Q=5$ MW)图7 不同通风条件及 Q 条件下 T_{\max} 随 h 的变化情况Fig.7 T_{\max} changing with h under different ventilation and Q conditions图8 $\Delta T_{\max}/T_a$ 与 $Q^{2/5}/(h_{ef}-h_0)$ 之间的关系Fig.8 Relation between $\Delta T_{\max}/T_a$ and $Q^{2/5}/(h_{ef}-h_0)$

II——火焰连续冲撞顶棚,顶棚最高烟气温升为定值。此外,火源尺寸对顶棚最高烟气温升也有影响,文献[9]提出虚点源法,弥补实际火源与理想点火源之间的差异,虚拟点源高度可以表示为:

$$h_0 = 0.083Q^{2/5} - 1.02D \quad (1)$$

式中:

h_0 ——虚点源高度,单位 m;

D ——火源等效直径,单位 m。

顶棚下方最高无量纲烟气温升 $\Delta T_{\max}/T_a$ (T_a 为环境温度)与 $Q^{2/5}/(h_{ef}-h_0)$ 之间的关系如图8所示。由图8可知:数据仍然可划分为两个区域,分区临界点约为 $Q^{2/5}/(h_{ef}-h_0) = 2.73$;顶棚最高无量纲烟气温升值约为3,这个上限值与文献[10]的顶棚最高无量纲烟气温升值数据2.9较为接近,但低于文献[8]的顶棚最高无量纲烟气温升值数据3.6。导致数据差异的原因与所研究的建筑类型、建筑内衬材料的热特性及燃料类型等因素有关。

通过数据线性拟合,可以获得预测顶棚下最高无量纲温升的经验模型^[8]为:

$$\frac{\Delta T_{\max}}{T_a} = \begin{cases} 1.1 \frac{Q^{2/5}}{h_{ef}-h_0}, & \frac{Q^{2/5}}{h_{ef}-h_0} < 2.73 \\ 3.0, & \frac{Q^{2/5}}{h_{ef}-h_0} \geq 2.73 \end{cases} \quad (2)$$

3.4 横向温度衰减

3.4.1 弱火羽流驱动顶棚射流

当火灾热释放速率较小或火源高度较低时,火焰未撞击顶棚,火羽流在冲撞顶棚后向四周扩散,发展为弱火羽流驱动的顶棚射流。工况1~3、工况8~10、工况15~17和工况22~23即属于弱火羽流驱动情况。文献[11]选用 h_{ef} 作为特征尺寸,量纲一化顶棚下方与冲撞点的距离 l ,则顶棚下不同位置的无量纲烟气温升可以表示为:

$$\frac{\Delta T_l}{\Delta T_{\max}} = f(l/h_{ef}) \quad (3)$$

式中:

ΔT_l ——顶棚下距冲撞点距离为 l 处的温升, 单位 K;

$f(l/h_{ef})$ ——关于 l/h_{ef} 的未知函数, 可通过拟合数据确定。

弱火羽流驱动时, $\Delta T_l/\Delta T_{\max}$ 与 l/h_{ef} 之间的关系如图 9 所示。由图 9 可知: 不同位置的烟气温升值随 l/h_{ef} 的变化具有较高的一致性。通过数据线性拟合可以获得 $\Delta T_l/\Delta T_{\max}$ 与 l/h_{ef} 的函数关系为:

$$\frac{\Delta T_l}{\Delta T_{\max}} = -0.85(l/h_{ef})^{1.17} + \exp[0.46(l/h_{ef})] \quad (4)$$

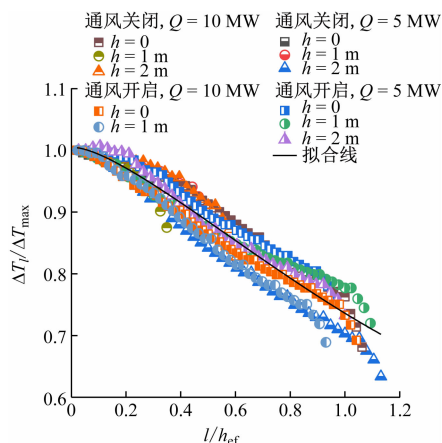


图 9 弱火羽流驱动时 $\Delta T_l/\Delta T_{\max}$ 与 l/h_{ef} 之间的关系

Fig. 9 Relation between $\Delta T_l/\Delta T_{\max}$ and l/h_{ef} under weak fire plume drive

3.4.2 强火羽流驱动顶棚射流

当火源功率较大或火源高度较高时, 火焰冲击顶棚, 形成强火羽流驱动顶棚射流。工况 4~7、工况 11~14、工况 18~21 和工况 24~28 属于强火羽流驱动情况。文献[12]以 l 与顶棚高度处的火羽流半径 b 的比值 (即 l/b), 作为特征参数, 研究强火羽流冲撞顶棚时的无量纲温升。 b 可以表示为:

$$b = [5.67(C_p \rho_a)^{4/5} T_a g^{2/5}]^{-1/2} \frac{T_{\max}^{1/2} Q^{2/5}}{\Delta T_{\max}^{3/5}} \quad (5)$$

式中:

C_p ——比定压热容, 单位 J/(kg·K);

ρ_a ——环境密度, 单位 kg/m³;

g ——重力加速度, 取 9.8 m/s²。

根据不同火源位置, 文献[13]将无量纲烟气温升分为火焰冲撞区和衰减区, 并提出两个区域的温度分布经验模型:

$$\frac{\Delta T_l}{\Delta T_{\max}} = \begin{cases} 1, & 1.7 \leq l/b \\ 1.37(l/b)^{-3/5}, & 1.7 < l/b \leq 4.3 \\ 6.42(l/b)^{-5/3}, & 4.3 < l/b \end{cases} \quad (6)$$

基于上述文献研究结果, 强火羽流驱动时, $\Delta T_l/\Delta T_{\max}$ 与 l/b 之间的关系如图 10 所示。由图 10 可知: 无量纲温升分为火焰连续冲撞区和衰减区; 在火焰连续冲撞区, 火焰持续冲撞顶棚, 无量纲烟气温升基本保持不变; 在火焰衰减区, 随着顶棚下方与冲撞点距离的增大, 无量纲烟气温升逐渐降低。

整理可得顶棚下方无量纲温升随 l/b 的变化关系式为:

$$\frac{\Delta T_l}{\Delta T_{\max}} = \begin{cases} 1, & l/b \leq 0.6 \\ 1.05 \exp[-0.092(l/b)], & 0.6 < l/b \end{cases} \quad (7)$$

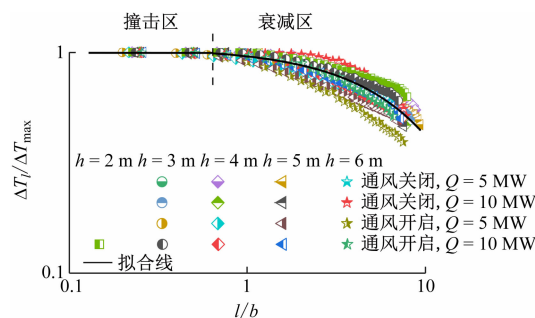


图 10 强火羽流驱动时 $\Delta T_l/\Delta T_{\max}$ 与 l/b 之间的关系

Fig. 10 Relation between $\Delta T_l/\Delta T_{\max}$ and l/b under strong fire plume drive

4 结语

本文以 3 号线齐川变电站为例, 通过 FDS 软件对室内主变压器室发生火灾后, 顶棚下的烟气温特性进行了分析, 主要获得以下结论:

1) 机械通风开启工况下, 室内气流组织影响顶棚烟气温分布, 补风会导致火羽流倾斜, 最高烟气温升向排风口偏移, 且最高烟气温升值略低于机械通风关闭工况。

2) 顶棚无量纲最高烟气温升可分为两个区域。当火焰未冲击顶棚时, 最高温升与 $Q^{2/5}/(h_{ef} - z_0)$ 呈线性关系; 当火焰冲击顶棚时, 无量纲最高烟气温升值为常数, 提出了顶棚无量纲最高温升的预测模型。

3) 提出了弱火羽流驱动和强火羽流驱动下的顶棚射流的温度衰减模型。

所提温度衰减模型为主变压器室火灾发生后顶棚的烟气温分布提供了边界条件, 对其结构的防火设计具有指导意义。

参考文献

- [1] NOVOZHILOV V, KOSEKI H. CFD prediction of pool fire burn-

- ing rates and flame feedback[J]. Combustion Science and Technology, 2004, 176(8): 1283.
- [2] CHATRIS J M, QUINTELA J, FOLCH J, et al. Experimental study of burning rate in hydrocarbon pool fires[J]. Combustion and Flame, 2001, 126(1/2): 1373.
- [3] ZHANG S, YANG H, YAO Y, et al. Numerical investigation of back-layering length and critical velocity in curved subway tunnels with different turning radius[J]. Fire Technology, 2017, 53(5): 1765.
- [4] JI J, WAN H, LI K, et al. A numerical study on upstream maximum temperature in inclined urban road tunnel fires[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 88: 516.
- [5] 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.
- 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.
- [6] 赵胜中. 纵向通风作用下隧道火灾烟气运输规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- ZHAO Shengzhong. Study on smoke movement under longitudinal ventilation in tunnel fires[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [7] YAO Y, LI Y Z, INGASON H, et al. The characteristics of under-ventilated pool fires in both model and medium-scale tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 87: 27.
- [8] LI Y Z, INGASON H. The maximum ceiling gas temperature in a large tunnel fire[J]. Fire Safety Journal, 2012, 48: 38.
- [9] HESKESTAD G. Virtual origins of fire plumes[J]. Fire Safety Journal, 1983, 5(2): 109.
- [10] JI J, FU Y, LI K, et al. Experimental study on behavior of side-wall fires at varying height in a corridor-like structure[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 2639.
- [11] DING H, QUINTIERE J G. An integral model for turbulent flame radial lengths under a ceiling[J]. Fire Safety Journal, 2012, 52: 25.
- [12] HESKESTAD G, HAMADA T. Ceiling jets of strong fire plumes[J]. Fire Safety Journal, 1993, 21(1): 69.
- [13] 高子鹤. 隧道内受限火羽流行为特征及竖井自然排烟机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- GAO Zihe. Studies on characteristics of confined fire plumes and mechanism of natural smoke exhaust by shaft in tunnel fires[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- 收稿日期:2023-02-10 修回日期:2023-04-10 出版日期:2024-07-10
Received:2023-02-10 Revised:2023-04-10 Published:2024-07-10
• 第一作者:甘露,高级工程师,upaup616@163.com
通信作者:王浩,高级工程师,wanghao@sdepci.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 210 页)

- [17] 王龙. CRH380B 综合检测车拖车转向架载荷测试方法与试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- WANG Long. Study on test method and experiment of load for trailer bogie frame of CRH380B comprehensive measured train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [18] 朱宁. 200 km/h 客运机车转向架构架结构载荷系标定方案研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- ZHU Ning. The research of load demarcation for 200 km/h passenger transportation electric locomotive bogie frame[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [19] 孙涛. 北京地铁动车转向架构架载荷特征及载荷谱编制方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- SUN Tao. Study on load characteristics and compilation of load spectrum on bogie frames of Beijing Metro[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [20] 彭立群, 潘锋, 林达文, 等. 动车组空气弹簧疲劳性能试验设计与研究[J]. 特种橡胶制品, 2019, 40(3): 49.
- PENG Liqun, PAN Feng, LIN Dawen, et al. Test design and research of fatigue performance for air spring of bullet train[J]. Special Purpose Rubber Products, 2019, 40(3): 49.
- 收稿日期:2024-02-23 修回日期:2024-03-22 出版日期:2024-07-10
Received:2024-02-23 Revised:2024-03-22 Published:2024-07-10
• 第一作者:王玉光,正高级工程师,wangyuguang@cqsf.com
通信作者:杨广雪,教授,gxyang@bjtu.edu.cn
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: tougao.umt1998.com