



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402334

引用格式:贾可,史波波,龙海帆.火源位置影响冷通道封闭数据中心烟气扩散规律[J].科学技术与工程,2025,25(5):2168-2174.

Jia Ke, Shi Bobo, Long Haifan. Influence of fire source location on smoke diffusion in closed cold channel of data center[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(5): 2168-2174.

环境科学、安全科学

火源位置影响冷通道封闭数据中心烟气扩散规律

贾可^{1,2}, 史波波^{1,2,3*}, 龙海帆^{1,4}

(1. 中国矿业大学煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 徐州 221116; 2. 中国矿业大学煤矿灾害防控全国重点实验室, 徐州 221116; 3. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012; 4. 蒙牛高科乳制品(北京)有限责任公司, 北京 101107)

摘要 冷通道封闭系统凭借其降温效率与成本方面的优势,越来越多地被应用于新型数据中心建设之中。由于封闭通道通风受限,一旦发生火灾,热烟气难以及时排出,会严重威胁数据中心设备及人员的安全,但目前数据中心常用线缆的火灾危险性缺乏实验数据和理论依据。利用 Pyrosim 软件构建冷封闭通道数据中心机房全尺寸物理模型,基于火灾动力学模拟器 (fire dynamics simulator, FDS) 数值模拟软件建立全尺寸火灾模型,模拟分析不同火源位置对烟气蔓延、能见度以及温度等火灾参数变化规律的影响。结果表明:当活动地板下方发生火灾,即最大热释放速率达到 2 000 kW 时,烟气在机房空调风流与活动地板的影响下会比机柜起火更快充满整个机房,安全出口测点处能见度低于 10 m 的时间比机柜内侧着火早 60 s;同时受空调风流与穿孔瓷砖影响,机柜内侧温度快速达到临界值,火灾危险性更大。研究成果可为冷通道封闭数据中心消防系统设计提供理论支撑。

关键词 数据中心; 冷通道封闭; 数值模拟; 烟气蔓延; FDS

中图分类号 X934; **文献标志码** A

Influence of Fire Source Location on Smoke Diffusion in Closed Cold Channel of Data Center

JIA Ke^{1,2}, SHI Bo-bo^{1,2,3*}, LONG Hai-fan^{1,4}

(1. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Institute of Mine Safety Technology, Beijing 100012, China; 4. Meng NIU HI-TECH Dairy (Beijing) Co., Ltd., Beijing 101107, China)

[Abstract] With its advantages in cooling efficiency and cost, the cold channel closed system is more and more used in the construction of new data centers. However, the closed channel system will turn the originally open channels between data center cabinets into narrow spaces with restricted ventilation. When the main combustibles in the data center catch fire, the accumulated hot smoke and gas in the closed channel cannot be timely discharged, seriously threatening the safety of data center equipment and personnel. At present, there is a paucity of experimental data and theoretical basis for the fire hazard of cables commonly used in data centres. Pyrosim software was used to establish a full-size physical model of the data center room in the cold closed channel, and fire dynamics simulator (FDS) software was used to establish a full-size fire model to simulate different fire source locations, so as to analyze the changes of fire parameters such as smoke spread rate, visibility and temperature distribution. The results show that when a fire occurs under the floor (maximum heat release rate reaches 2 000 kW), the smoke would fill the whole machine room more quickly due to the influence of the special air conditioning airflow and floor than the cabinet fire. The visibility at the safety exit measuring point reached 0 m, 60 s earlier than the fire at the inside of the cabinet. At the same time, affected by the air conditioning airflow and perforated tiles, the temperature at the inside of the cabinet quickly reaches the critical value where the fire hazard is much greater. The results could provide important theoretical support for the fire protection system design of the cold channel of closed data center.

[Keywords] data center; closed cold channel; numerical simulation; smoke spreading; FDS

收稿日期: 2024-04-02 修订日期: 2024-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(52474262, 52234006); 江苏省自然科学基金(BK20211585)

第一作者: 贾可(2001—), 女, 汉族, 山西临汾人, 硕士研究生。研究方向: 公共安全、火灾防治。E-mail: jiake2021@126.com。

* 通信作者: 史波波(1987—), 男, 汉族, 山西长治人, 博士, 教授, 博士研究生导师。研究方向: 公共安全、火灾防治。E-mail: shi_bobo@yeah.net。

随着第五代移动通信技术(5th generation mobile communication technology, 5G)和云计算等新一代数字技术的快速发展,数据中心已经逐渐成为中国政府机构和企业数字经济时代的核心基础设施。冷通道封闭系统是一项用于降低机房中运行设备温度的技术,它能将机柜、设备隔离在机房热空气外,并将冷空气限制在机柜中,有效避免冷热空气混合,从而改善冷空气利用率、提高机房制冷效率和制冷效果。凭借在提高机房空调系统降温效率与降低数据中心运营成本方面的优势,冷通道封闭系统被越来越多地应用于新型数据中心建设之中。但由于数据中心机柜间的通道被密封设计成一个狭窄且通风受限的区域,同时数据中心电力及通信电缆布线方式复杂,这使得数据中心发生火灾时,不仅火源位置难以确定,而且火灾所产生的烟气在有限空间内蔓延积蓄,进而可能导致数据中心出现温度上升和能见度降低等多重隐患,对数据中心的正常运行以及人员安全造成不利影响。目前,已有学者对数据中心的节能降温,王瑜等^[1]对比分析了不同冷源应用于数据中心的优缺点以及喷雾冷却系统的优化,提出了系统联动反馈调节装置;王江江等^[2]通过分析数据中心耗能单元的负荷,优化了数据中心设备容量以及调度策略,设计了一种集成余热利用设备的综合能源系统。二是对数据中心火灾的监控测防护,刘建翔等^[3]针对数据中心现有灭火系统存在的问题,利用主动空气采样感烟探测技术和光学仿真软件,发明了一种应用于模块化数据中心的感烟灭火装置;朱明秋等^[4]分析了数据中心火灾特点,并以某数据中心工程为例,总结了灭火系统设计要点;黄旭光等^[5]分析了当前数据中心自动气体灭火系统防护区的规范及案例,对不同类型的火灾自动灭火系统启动方式的适用性进行了比较。三是对传统机房的火灾模拟,南天辰等^[6]结合工程实例,对热通道封闭数据机房火灾事故进行模拟,对比分析了不同补风口布局等排烟设计参数对排烟效果的影响,提出了一种应用于热通道封闭数据中心的防排烟方案;Meng等^[7]对计算机数据中心进行了火灾模拟,分析了液氮在火灾初始加热阶段的冷却过程以及对常见可燃物的灭火效果,揭示了在数据中心运用液氮灭火系统的可行性与优越性。

现有研究鲜有冷封闭通道系统内火源位置对机房火灾相关参数影响的研究,此外,以往火灾仿真模拟中燃烧反应设置、网格划分较为粗略,未考虑火灾发生时活动地板、穿孔瓷砖以及空调等因素对火灾烟气蔓延规律的影响,难以反映真实的火灾场景。为此,现基于火灾动力学模拟器(fire dynamics simula-

tor, FDS)数值模拟软件,对冷通道封闭数据中心电缆火灾场景进行精细化建模,研究其在不同火源位置下火场温度、能见度与烟气蔓延规律,为后续冷通道封闭数据中心防灭火设计提供重要理论依据。

1 冷通道封闭数据中心火灾模型设置

1.1 模型建立

根据冷封闭通道数据中心实物以及《数据中心设计规范》(GB 50174—2017)^[8],利用 Pyrosim 软件建立徐州某移动公司冷封闭通道数据中心机房物理模型。如图 1 所示,模型面积为 18 m × 18 m,高度为 4.8 m(活动地板高 0.5 m),机房内均匀分布 3 组机柜,单侧布置 5 台空调,空调通风量为 3 m³/s,使用 Vent 固定风量模拟空调送风。机房空调系统采用下送上回的气流组织形式,活动地板作为下送风口,穿孔瓷砖孔隙率为 25%。天窗、端门及空调由烟雾探测器联动控制,当烟雾探测器检测到烟雾遮光率达到 0.01% obs/m 时[% obs/m 为遮蔽度或减光率,是指在经过单位长度后,光被烟雾颗粒遮蔽程度的百分比,obs/m(obscurity per meter)即每米遮蔽度],封闭通道天窗与端门延时开启,空调延时关闭,延迟时间分别设为 5 s 和 10 s。

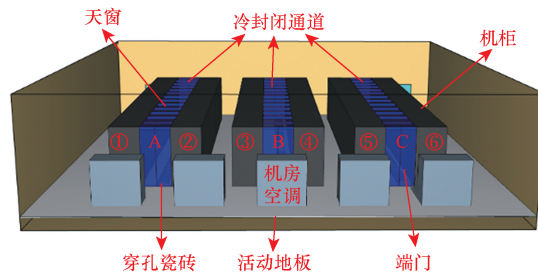


图 1 数据中心物理模型示意图

Fig. 1 Schematic of the physical model of a data center

1.2 测点布置

仿真模型中设置有热电偶(THCP)、烟雾探测器(SD)和能见度探测器(GAS)。在 3 组冷封闭通道内设置等间距 2 m 的热电偶 THCP11 ~ THCP16、THCP21 ~ THCP26、THCP31 ~ THCP36,共 18 个;封闭通道两侧各布置一个烟雾探测器 SD11 ~ SD12、SD21 ~ SD22、SD31 ~ SD32,共 6 个,两处安全出口布置测点 GAS1、THCP1、GAS2、THCP2,各探测器在机房内的位置分布如图 2 所示。

1.3 火灾场景设置

1.3.1 燃烧反应选取

数据中心机房在防静电地板下铺设的大量电力及通信电缆是数据中心电气火灾的主要隐患^[6]。考虑到数据中心通信及电力电缆的护套和绝缘材料

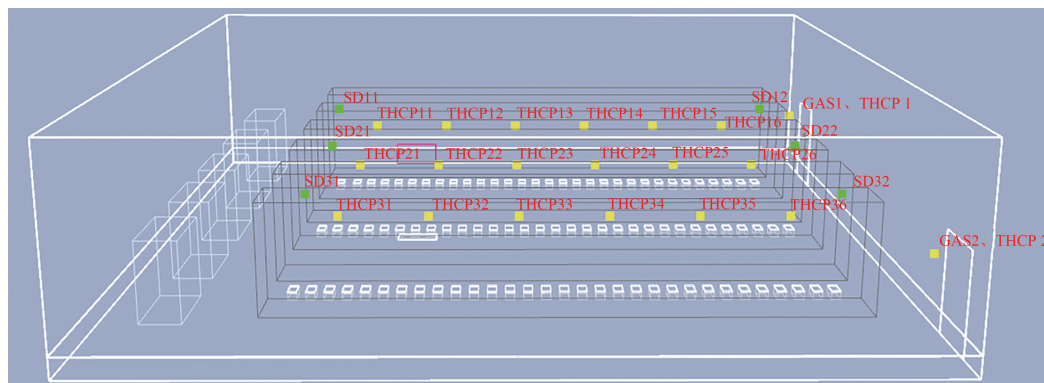
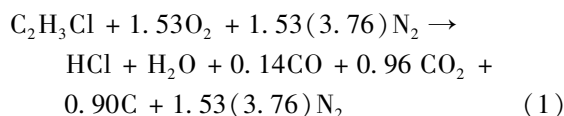


图2 探测器位置分布图

Fig. 2 Distribution of detector locations

通常由塑料制成,因此选取聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)作为燃烧反应物。

选用复杂化合物燃烧反应,自行定义可燃物(PVC)分子式及燃烧反应等。根据 FDS 用户指南中给出的建议^[9],若火灾中的主要燃料是 PVC,可忽略其聚合物的详细结构,建模时简化为 C_2H_3Cl ,其燃烧反应方程式为



1.3.2 火源热释放速率设置

火灾的热释放速率(heat release rate, HRR)一般可以通过实际火灾试验、类似火灾试验、计算火灾蔓延和适当假设特征火灾曲线 4 种方法确定^[10],采用类似火灾试验方法选定。Zeng 等^[11]在平行面板火灾测试中测得的数据中心通信电缆热释放速率接近 2 000 kW,考虑到在进行火灾数值模拟研究时遵循最不利原则,将模拟最大 HRR 定为 2 000 kW。可燃物主要由塑料组成,因此将火灾类型设置为快速火,火灾增长系数 $\alpha = 0.046\ 89\ kW/s^2$ 。

$$Q = \alpha t^2 \quad (2)$$

式(2)中: Q 为火灾热释速率,kW; α 为火灾增长系数, kW/s^2 ; t 为火灾发生后的时间,s。将 Q 和 α 的值代入式(2),可得火灾 206 s 左右达到最大热释放速率。数值模拟时间为 400 s,环境初始温度为 23.7 °C,相对湿度为 14.6%。

1.3.3 工况设定

为研究冷封闭通道系统中活动地板、空调、天窗及端门等构筑物对火灾烟气蔓延规律的影响,结合现场线缆布设集中在通道 B 下方及两侧机柜,本文选择火灾危险性最大^[12]的冷封闭通道 B 下方和 4 号机柜两种火源位置,火源热释放速率保持一致,具体工况设置如表 1 所示。

表 1 模拟工况设置表

Table 1 Simulation of working conditions

工况	HRR _{max} /kW	火源位置	火源中心点位置坐标
S1	2 000	冷封闭通道 B 下方	(6.5, 9.6, 0)
S2	2 000	4 号机柜内侧	(6.5, 9.6, 2)

1.4 网格划分及独立性验证

FDS 模拟火灾时,火源特征直径 D^* 用于确定网格尺寸,网格大小应在 $0.25D^* \sim 0.062\ 5D^*$ 范围内,火源特征直径计算公式^[13]为

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (3)$$

式(3)中: \dot{Q} 为火灾热释放速率,kW; ρ 为空气密度, kg/m^3 ,取 $1.204\ kg/m^3$; C_p 为空气比热容, $kJ/(kg \cdot K)$,取 $1.005\ kJ/(kg \cdot K)$; T_{∞} 为环境温度,K,取 297 K; g 为重力加速度, m/s^2 ,取 $9.81\ m/s^2$ 。根据火源热释放速率 2 000 kW,算得火源特征直径为 1.26 m。

由于过度细化网格并不会提高模拟精度^[14],因此在模拟之前对网格划分独立性进行测试,在保证模拟结果准确性的基础上节约运算时间。通过比较不同网格尺寸下相同测点温度变化情况验证网格独立性,3 种网格尺寸温度随时间变化曲线如图 3 所示。

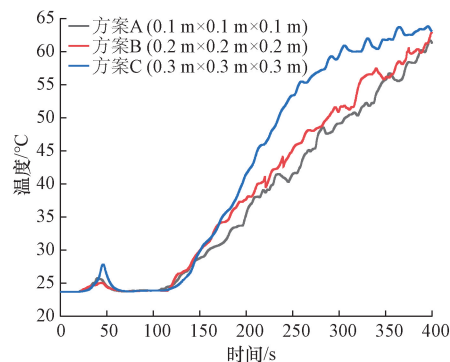


图3 不同网格尺寸下测点处烟气温度

Fig. 3 Flue gas temperature at measurement points with different grid sizes

由于方案 C 的划分较为粗糙,模型部分区域难以贴合网格,运算时模型会有一定变形,模拟结果与方案 A、B 差异较大,而方案 A、B 的温度曲线吻合度高,即 B 方案可以实现网格独立。FDS 要求网格划分应为 $2^\alpha \times 3^\beta \times 5^\gamma$ 的形式,式中 α, β, γ 为整数^[15]。将核心着火区域 $X = (3.6, 18.0), Y = (7.0, 11.0), Z = (0.0, 4.8)$ 的网格尺寸设定为方案 A,其余的网格尺寸均按方案 B 设置,使用 7 组网格并行运算,网格总数 436 320 个。

2 火源位置对数据中心火灾烟气蔓延的影响规律

2.1 烟气蔓延规律分析

图 4 为工况 S1 不同时刻机房烟气蔓延分布情况。火灾发生后,烟气受空调风流作用在活动地板下方由着火点向右顺风流扩散的同时,部分烟气透过穿孔瓷砖蔓延至封闭通道内部。在 27 s 时,烟雾探测器探测到烟气并移除封闭通道端门及天窗后,

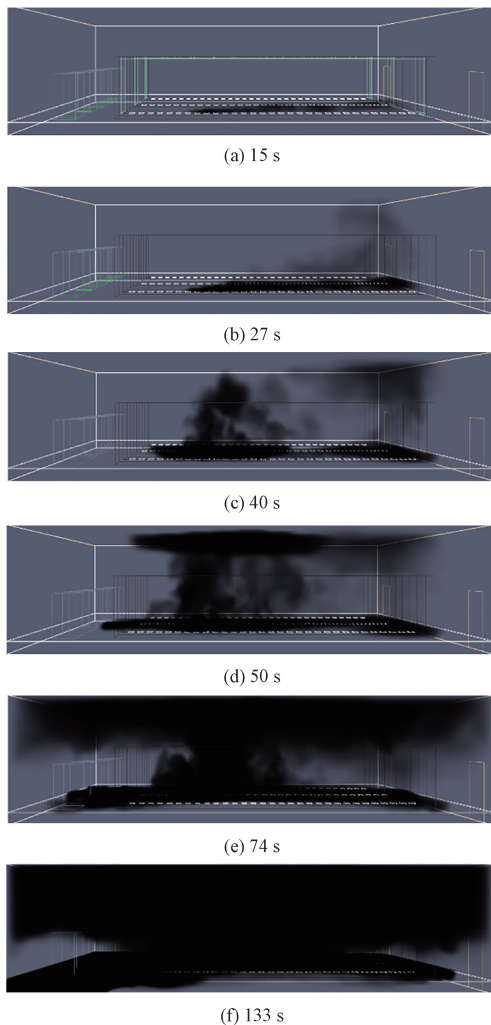


图 4 工况 S1 烟气蔓延侧视图

Fig. 4 Side view of flue gas spread for condition S1

空调还未停止,烟气仍受风流影响向右扩散。当空调完全停止后,高温烟气从起火点竖直向上扩散,上升至天花板后发生顶棚射流,沿顶棚向四周水平扩散,由于机房顶部无横梁的阻碍,烟气沿天花板快速向四周运动。74 s 时机房四周墙体对水平扩散的烟气产生阻挡和冷却效果,烟气逐渐沿墙体向下流动并不断聚集,烟气层厚度增大从而不断向下弥漫,最终充满整个数据中心机房。

工况 S2 时烟气蔓延规律如图 5 所示,在封闭通道构筑物开启之前,火灾生成的烟气在浮力的作用下从着火点向上运动,蔓延至天窗后在封闭通道内部扩散。天窗及端门开启后,封闭通道内部积聚的烟气整体向上传播,触碰到天花板后发生顶棚射流现象,向四周扩散,形成烟气层并随时间增厚。

分析两种工况下烟气蔓延至运维人员逃生的眼部高度,即距活动地板 1.8 m^[16] 所需时间。如图 6 所示,工况 S1 时,火灾烟气发生顶棚射流,烟气向四周水平扩散的同时通过穿孔瓷砖扩散至活动地

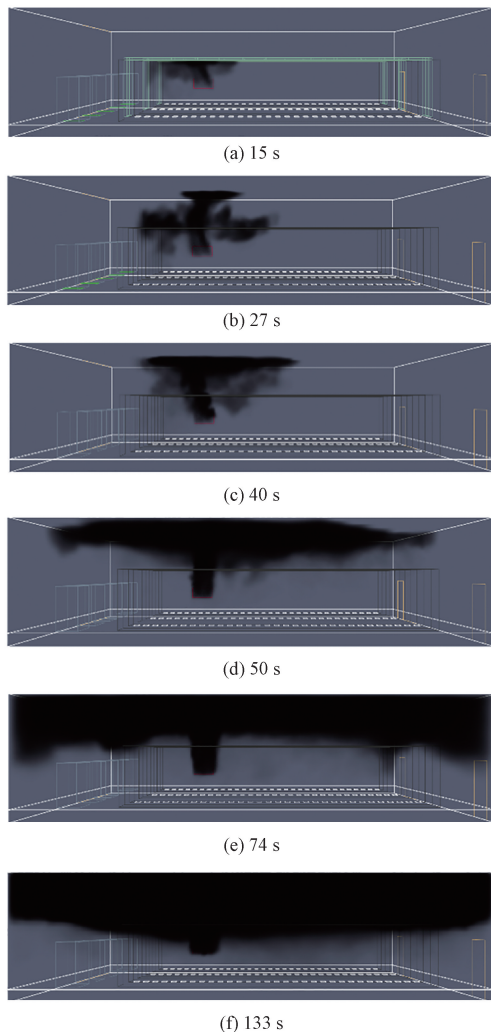


图 5 工况 S2 烟气蔓延侧视图

Fig. 5 Side view of flue gas spread for condition S2

板上方,在空调风流向右的作用下,烟气更快充满整个机房。而工况 S2 中机柜内侧起火时,烟气只受到空调风流的向上推升作用,封闭通道端门及天窗在火灾初期不会立即开启,一定程度上阻止了烟气向外扩散,烟气蔓延速度相对较慢。工况 S2 时烟气层在 133 s 蔓延至 1.8 m,而工况 S1 的烟气在 110 s 时已充满 3 个封闭通道,且机房其他空间的烟气层蔓延至 1.8 m 以下。综上,活动地板下方起火后,烟气蔓延至 1.8 m 以下的时间比机柜内侧起火早 23 s,且此时烟气已充满 3 个封闭通道,烟气蔓延规律更复杂,危险程度更高。

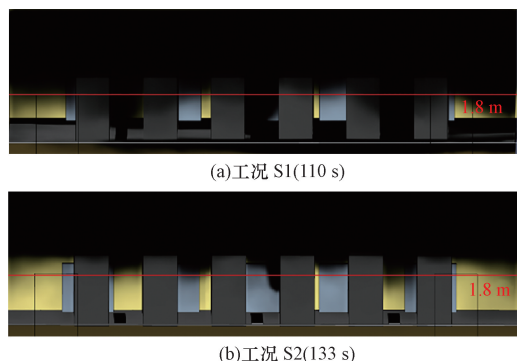


图6 不同工况下烟气蔓延主视图
Fig. 6 Main view of flue gas spreading under different working conditions

2.2 能见度结果分析

《美国消防工程师学会消防工程手册》^[17]指出人员疏散最小能见度的选取可针对不同大小的空间单独确定,以 10 m 为影响人员逃生的临界能见度。在模型中 $Y=4.2$ m、 $Y=9.0$ m 及 $Y=13.8$ m 平面设置能见度切片(如图 7 所示)。机房上部空间能见度随时间变化逐渐降到 1 m 以内。工况 S1 在 150 s 时房间大部分空间的能见度低于 5 m,整个房间被烟气笼罩;工况 S2 中房间下部空间能见度大于 10 m,人员可采取弯腰或者匍匐前进的方式快速逃生。

图 9 为两种工况下安全出口距地面 2.3 m 处(活动地板上方 1.8 m)的能见度随时间变化曲线。结合图 8(a)可以看出,工况 S1 时,火灾初期烟气受空调风流影响向右运动并有部分烟气透过穿孔瓷砖蔓延至封闭通道内,在端门与天窗开启后,通道内烟气持续向右运动并蔓延至安全出口,使安全出口处能见度急速下降。活动地板下方起火时两个安全出口测点处能见度维持在 10 m 以上的的时间更短,相较机柜内侧着火的工况减少了 60 s,这与烟气蔓延规律高度吻合。

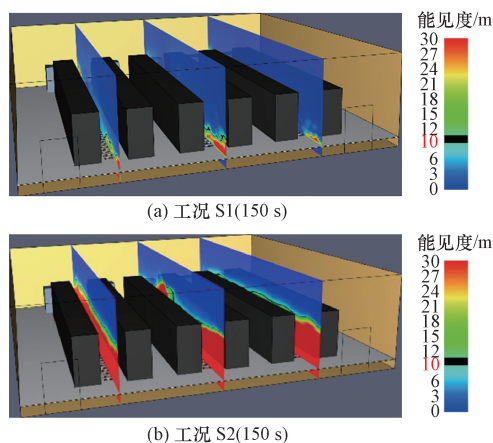


图7 不同工况纵向能见度切片对比图
Fig. 7 Comparison of longitudinal visibility slices for different working conditions

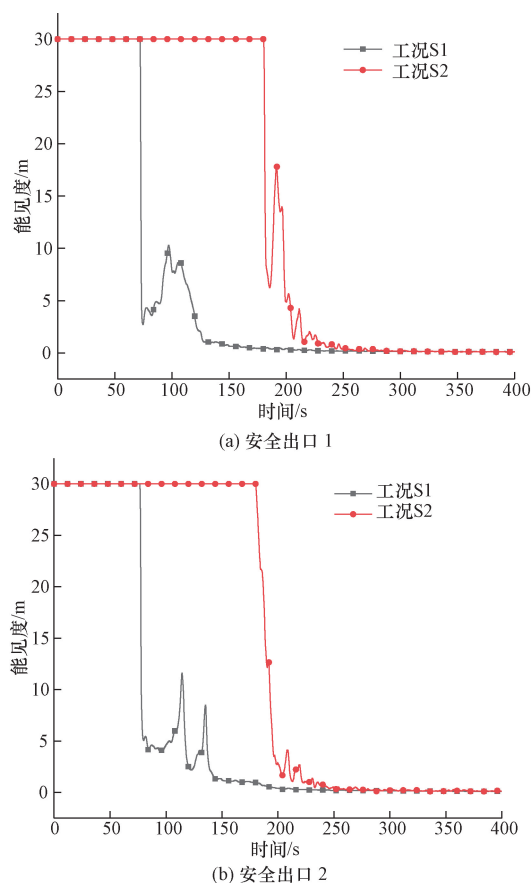


图8 距地面 2 m 高度处烟气能见度分布
Fig. 8 Smoke visibility distribution at a height of 2 m above ground level

2.3 温度变化分析

数据中心机房内精密电子设备对温度变化非常敏感,机房火灾生成的高温环境会造成服务器损坏。美国采暖,制冷与空调工程师学会于 2015 年发布的第四版《数据处理环境热指南》^[18]中建议数据

中心温度不要超过 32 ℃,因此设置临界温度 $T_c = 32$ ℃。不同工况下各个封闭通道内测点温度随时间变化曲线如图 9 所示。对比工况 S1 和工况 S2 可以发现,火源位置处于工况 S1 时,B 封闭通道后半部和 A、C 封闭通道的测点温度起初并无明显变化,120 s 后温度开始缓慢上升,280 s 后温度趋于稳定,在 400 s 时温度达到 60 ℃左右。靠近火源的 B 封闭通道前半部 THCP21、THCP22 处测点温度上升较快,火源上方测点温度最高可达 220 ℃,在 172 s 后各测点温度均超过临界温度。工况 S2 情况下,除了距离火源位置最近的 THCP22 处的测点温度上升迅速,在达到最大热释放速率后温度在 150 ℃上下波动,其余区域测点处温度上升相较于工况 1 更为缓慢,在 220 s 后各测点温度均超过临界温度,比工况 S1 多 48 s,提供了更长的救援时间。

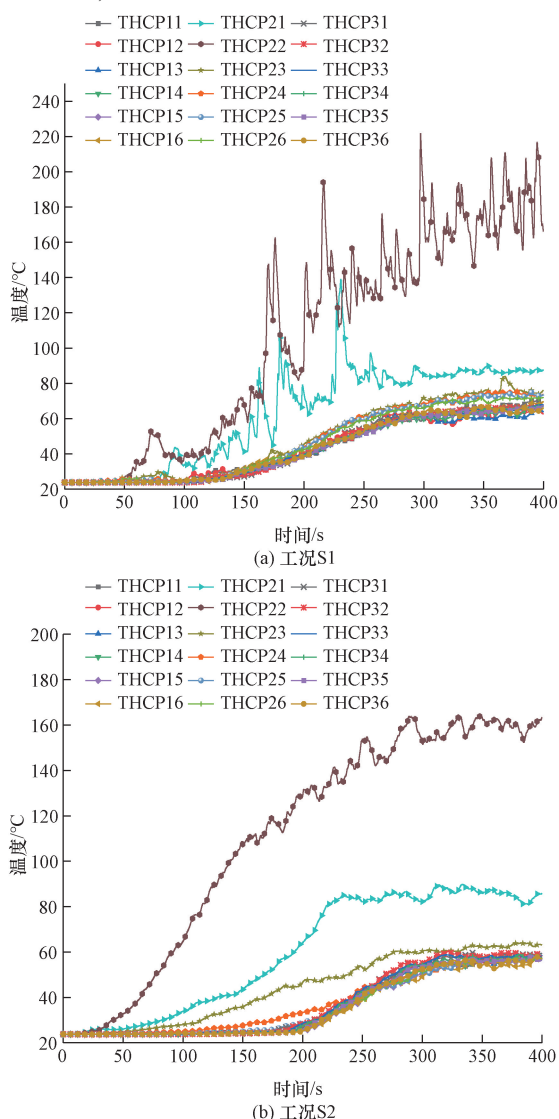


图9 封闭通道内测点温度变化情况

Fig. 9 Temperature changes at measurement points in closed channels

3 结论

数据中心作为存储、处理和分发数据的核心枢纽,其电气火灾危险性是目前的主要研究方向。本文利用 Pyrosim 软件建立冷封闭通道数据中心机房全尺寸物理模型,基于 FDS 大涡模拟方法研究了不同火源位置下冷封闭通道数据中心火灾烟气蔓延规律,通过对烟气蔓延、能见度以及温度等火灾参数变化规律的分析,得到如下主要结论:

(1) 由于活动地板及空调风流影响,活动地板下方起火时烟气充满人眼(1.8 m)及眼部以上空间的时间比机柜内侧起火早 23 s,且在 110 s 时烟气充满 3 处封闭通道,能见度低于 10 m,烟气蔓延规律更复杂,危险程度更高。

(2) 活动地板下方起火时,烟气更早蔓延至安全出口处,烟气浓度较高,两处安全出口能见度低于 10 m 的时间比机柜内侧着火早 60 s 以上,具有更高的火灾危险性,因此需要重点加强监测与预防控制。

(3) 活动地板下方起火时,活动地板下方起火时封闭通道内部温度达到 32 ℃ 的时间比火源位于机柜内侧时早 48 s,使数据机柜面临高温损坏的风险,因此,为保护数据中心设备正常运行,进行火灾防护设计时应重点防范活动地板下方火灾。

参考文献

- [1] 王瑜,吴露露,康娜,等. 数据中心喷雾冷却系统研究进展和要素分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7391-7403.
Wang Yu, Wu Lulu, Kang Na, et al. Research progress and factors analysis of spray cooling system in data center[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(18): 7391-7403.
- [2] 王江江,邓洪达,刘艺,等. 数据中心综合能源系统配置与运行的集成优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 1968-1977.
Wang Jiangjiang, Deng Hongda, Liu Yi, et al. Integrated optimization of configurations and operations of integrated energy system for data center[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(5): 1968-1977.
- [3] 刘建翔,李宗,赵志鹏,等. 模块化数据中心感烟灭火装置优化设计[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(1): 100-103.
Liu Jianxiang, Li Zong, Zhao Zhipeng, et al. Optimal design of smoke fire extinguishing device in modular data center[J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(1): 100-103.
- [4] 朱明秋,马忠秋. 某数据中心机房自动灭火系统设计与分析[J]. 工业用水与废水, 2022, 53(5): 84-88.
Zhu Mingqiu, Ma Zhongqiu. Design and analysis of automatic fire extinguishing system for computer room of a data center[J]. Industrial Water & Wastewater, 2022, 53(5): 84-88.
- [5] 黄旭光,程丽,周丹萍. 数据中心气体灭火系统多防护区设置的研究[J]. 今日消防, 2023, 8(7): 88-90.
Huang Xuguang, Cheng Li, Zhou Daping, et al. Study on the setting of multiple protection zones of data centre gas extinguishing system [J]. Fire Protection Today, 2023, 8(7): 88-90.

- [6] 南天辰, 沈逸赅, 陈浩华, 等. 数据中心封闭热通道模块间防排烟系统优化设计研究[J]. 暖通空调, 2022, 52(3): 62-71.
Nan Tianchen, Shen Yilai, Chen Haohua, et al. Study on optimal design of smoke evacuation systems of closed hot aisle modular rooms in data centers [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(3): 62-71.
- [7] Meng J B, Wang T R, Li G H, et al. Simulation test on cooling and fire suppression with liquid nitrogen in computer room of data center[J]. Fire, 2023, 6(3): 116.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 数据中心设计规范: GB 50174—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Data center design code: GB 50174—2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017.
- [9] McGrattan K, Hostikka S, McDermott R, et al. Fire dynamics simulator (version 4) user's guide[R]. Maryland: NIST Special Publication, 2013.
- [10] 王志刚, 倪照鹏, 王宗存, 等. 设计火灾时火灾热释放速率曲线的确定[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(6): 50-54.
Wang Zhigang, Ni Zhaopeng, Wang Zongcun, et al. Determination of heat release rate curve when designing fire[J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(6): 50-54.
- [11] Zeng D, Su P P, Madan R, et al. Evaluation of flammability and smoke corrosivity of data/power cables used in data centers[J]. Fire Safety Journal, 2021, 120: 103094.
- [12] 康建宏, 张欣雨, 邬锦华, 等. 计算机数据中心液氮防灭火数值模拟[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(7): 904-907.
Kang Jianhong, Zhang Xinyu, Wu Jinhua, et al. Numerical simulation of liquid nitrogen fire prevention in computer data center [J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(7): 904-907.
- [13] Yan G, Wang M, Yu L, et al. Effects of ambient pressure on the critical velocity and back-layering length in longitudinal ventilated tunnel fire [J]. Indoor and Built Environment, 2020, 29(7): 1017-1027.
- [14] Mawhinney J R, Trelles J. Performance testing of fire protection systems in tunnels: Integrating test data with CFD simulations[J]. Engineering, Environmental Science, 2010(1): 297-309.
- [15] 肖国清, 姚泽胜, 邓洪波, 等. 基于FDS的加油站便利店火灾模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(1): 143-149.
Xiao Guoqing, Yao Zesheng, Deng Hongbo, et al. Simulation on fire in convenience store of gas station based on FDS[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(1): 143-149.
- [16] 田向亮, 钟茂华, 刘畅, 等. 不同阻塞条件下的隧道火灾全尺寸试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 93-101.
Tian Xiangliang, Zhong Maohua, Liu Chang, et al. Experimental study on safety full-scale of tunnel fire disaster under different blocking conditions[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 93-101.
- [17] Hurley M J, Gottuk D T, Jr J R H, et al. SFPE handbook of fire protection engineering[M]. New York: Springer, 2016.
- [18] ASHRAE. Thermal guidelines for data processing environments [M]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2015.