

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221028003

火源位置对凹型砖木结构古建筑火蔓延特性影响研究*

张 妮^{1,2}, 刘雪梦¹, 舒 盼¹, 黄罗鑫¹, 张陆陆¹, 张 帅¹

(1. 西安科技大学安全科学与工程学院, 陕西 西安 710000; 2. 西安市城市公共安全与消防救援重点实验室, 陕西 西安 710000)

摘要: 为探究凹型砖木结构古建筑火灾蔓延特性,以某典型凹型古建筑为研究对象,利用Pyrosim软件进行物理模型搭建,研究不同火源位置对火灾蔓延规律的影响,以及在该过程中温度、能见度变化规律和CO、CO₂浓度动态分布情况等。结果表明:不同火源位置对火蔓延特性影响较大,若引火源位于凹型古建筑西南角,相较西北、正北方向两个工况,热释放速率可高达240 MW/s,应选择在该处设置多个感温探测器及自动喷淋系统用于火灾防范;若引火源位于建筑西南角,相较其他工况室内温度可达最高值1 000 ℃,CO、CO₂浓度亦均达最值,且在垂直高度1.67 m处能见度下降速率达到峰值,人员需在2 min内全部疏散。该研究对于凹型砖木结构古建筑火灾防控、防火装置的合理排布及灾后人员高效、安全疏散具有重大意义和参考价值。

关键词: 凹型古建筑; 砖木结构; 火蔓延; 燃烧参数; 数值模拟

中图分类号: X45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1313-09

Study on the Influence of Fire Source Location on Fire Propagation Characteristics of Ancient Buildings with Concave Brick and Wood Structures

ZHANG Yanni^{1,2}, LIU Xuemeng¹, SHU Pan¹, HUANG Luoxin¹, ZHANG Lulu¹, ZHANG Shuai¹

(1. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710000, China;

2. Xi'an Key Laboratory of Urban Public Safety and Fire Rescue, Xi'an 710000, China)

Abstract: To explore the fire spread characteristics of ancient buildings with concave brick and wood structures, a typical concave ancient building is used as the research object, and the physical model is built by using Pyrosim software to study the influence of different fire source locations on the law of fire spread, as well as the change of temperature, visibility and the dynamic distribution of CO and CO₂ concentrations in the process. The results show that different ignition source locations have a greater impact on the fire propagation characteristics, and if the ignition source is located in the southwest corner of the concave ancient building, compared with the northwest and north directions, the heat release rate can reach the maximum value of 225 MW/s; If the ignition source is located in the southwest corner of the building, the indoor temperature can reach the maximum value of 1020 ℃ compared with other working conditions, the concentrations of CO and CO₂ are also at their maximum values, and the visibility degradation rate reaches the peak at a vertical height of 1.67 m. This study

* 收稿日期:2022-10-28;修回日期:2022-12-25

基金项目:陕西省创新能力支撑计划(2020TD-021)资助

作者简介:张妮(1978—),女,教授,博导,博士。主要从事建筑火灾防护研究。E-mail:zyn2099@xust.edu.cn

has great significance and reference value for the fire prevention and control of ancient buildings with concave brick and wood structures and the efficient and safe evacuation of personnel after disasters.

Keywords: concave ancient buildings; brick and wood construction; fire spreading; combustion parameters; numerical simulation

0 引言

古建筑是中国历史文化的重要组成部分,它既承载了我国悠久的历史文明,也体现了对优秀传统文化的继承与延续,具有很高的精神价值、文化价值、历史价值和艺术价值^[1-3]。我国现存古建筑大多采用砖木结构搭建,具有耐火等级低、火灾荷载量大、火势蔓延速度快等特点^[4-5],而凹型古建筑作为具有特殊结构特点的一类,易形成“炉膛效应”,燃烧速度更快、产烟量更大^[6-8]。因此,研究凹型古建筑火灾蔓延规律,对该类古建筑火灾防控及火灾事故发生后人员安全疏散具有重要意义^[9-10]。

在砖木结构古建筑火蔓延研究方面,张盛东等^[11]通过木材燃烧实验,总结了木材在高温条件下的温度曲线;许清风等^[12]对火灾发生后木结构建筑的微观结构变化、木材炭化机理以及木材炭化速度进行了大量分析研究;高先占^[13]以丽江的木结构民居为例,通过足尺实验探究了木结构建筑的热解参数;怀超平^[14]利用木材热重实验,研究了不同木材热解参数对木结构文物建筑火蔓延过程的影响;M.Bullock等^[15]通过搭建六层高的木结构建筑进行足尺火灾实验,分析木隔板和楼板产生的阻隔作用;S.F. Tung等^[16]以木结构古建筑为研究对象,探究室内空气温度、火源热释放速率与火灾蔓延规律之间的关系;潘晓菲^[17]通过数值模拟,研究结构因子的变化导致凹型建筑结构外立面呈现不同的火灾烟气蔓延规律;王宇等^[18]采用Pyrosim对不同结构因子、窗户尺寸、火灾荷载密度及纵向窗口数量等因素影响下的火灾建筑模型进行数值模拟;张玉涛等^[19]运用Pyrosim软件,探究凹型结构建筑外立面挤塑聚苯乙烯外墙保温材料的火蔓延特性;杨舜博^[20]采用Pyrosim软件分析凹型高层建筑处于危险温度时火焰融合的高度与各影响因素之间的变化规律。

综上所述,学者们通过开展实验和仿真模拟,对各类(砖)木结构古建筑在不同外在因素条件下的温度场、浓度场等方面进行深入研究,获取较多关于木材、构件和燃烧特征与建筑燃烧规律的数据

和成果。凹型结构建筑在我国建筑结构中占比较多^[21],且结构形状特殊。但综合来看,该类建筑在不同火源位置影响下的火灾蔓延特性研究较少,尚缺乏全面、成体系的研究结论。因此,本文以凹型砖木结构古建筑为研究对象,以数值模拟为主要研究手段,探究火源位置对凹型砖木结构古建筑火灾蔓延特性的影响规律。

1 模型构建及参数设置

1.1 建筑概况及模型建立

本文以西安市某博物馆内一凹型古建筑为研究对象,先后开展实地调研、数据采集、模型搭建及修正与火灾模拟等工作。整体来看,该砖木结构建筑俯视图呈“凹”字型,建筑面积约460 m²,高度7.9 m。该古建筑结构为典型的台梁式建筑,设有两个侧门和两个正门,含52扇栏窗,由于馆内存有藏品(馆内藏品均为不可燃物),栏窗一直处于关闭状态。其中,室内的木柱、梁、檩、椽子、门、窗及照明设施为主要可燃物。

根据实地调研及图纸查阅,采用Pyrosim软件对该建筑进行一比一全尺寸物理模型搭建,如图1所示。

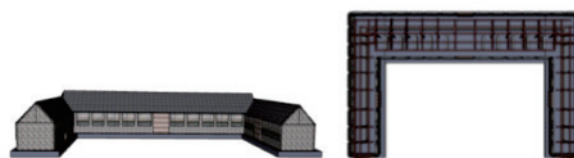


图1 模型正视及内部结构俯瞰图

Fig.1 Front view and aerial view of the model's internal structure

在利用Pyrosim软件时,划分网格是进行仿真的先行条件,建筑模型所采用的是全局网格分化,网格的大小设置在利用计算机进行模拟的过程中会很大程度影响模拟的结果以及精确程度。本文首先使用傅里叶的快速转换公式来验证其是否合理后再进行设置^[22-23]。在进行了数次的网格数量

设置后,选取了最具代表性的两种网格进行描述。当采用 $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 的规格时,网格总数为75.34万,规格为 $0.25\text{ m}\times 0.25\text{ m}\times 0.25\text{ m}$ 时,网格总数为41.24万。通过对比分析41.24万与75.34万网格的建筑模型可以得到,随着网格数量的增加,模拟的质量会越高,模拟运行的时间也会加长。但41.24万与75.34万的网格除了数量上以及计算时长增加了以外,模拟精度并没有提高。在模拟时长以及计算精度的综合考量之后,在点火源附近均采用 $0.25\text{ m}\times 0.25\text{ m}\times 0.25\text{ m}$ 的网格设置。在网格进行了无关性检验后,为了在确保模拟精度和网格质量的前提下降低网格数量,在此采用了多重网格的设置方法,也就是在设置火源点的周围将网格大小设置为 $0.25\text{ m}\times 0.25\text{ m}\times 0.25\text{ m}$,在火源点外围的地方将网格大小设置为 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 。这种设置方法不但保证了模拟精度,而且在网格数量减少后,模拟时长会大大降低,它是一种在利用软件进行大面积火灾模拟时非常可取的方法。

1.2 模拟场景及参数设置

近十年来,全国共接报文物古建筑火灾392起,直接财产损失2 808.9万元。从火灾的成因来看,其中60.2%为电气直接或间接引起,电气故障成为引发文物古建筑火灾的主要原因^[24]。经实地调研,该建筑内有线路及灯具悬挂于梁上。因此,本模型依据悬挂在横梁的电气线路短路,引燃横梁发生火灾的情况进行场景设计。

依据该建筑凹型轴对称的结构特点,本文只考虑在建筑一侧进行模拟研究。因此,选取了建筑内三处典型火源位置(西南方向为工况一,西北方向为工况二,正北方向为工况三),因火源点设置在建筑内的木质横梁上,尺寸大小为 $0.25\text{ m}\times 4\text{ m}$,具体如图2所示。此外,模拟采用单一变量原则,在通风条件、火源功率及其他参数设置相同条件下改变火源位置进行仿真模拟,以确保研究火源位置对火蔓延影响规律的准确性(为真实模拟博物馆开放接客情况,门均呈开启状态,窗均呈关闭状态)。

模型中通过设置热电偶、气体测点及温度切片来研究该建筑发生火灾后的温度场和浓度场变化规律,其中热电偶及水平切片以人的平均身高 1.67 m 为参考点进行排布^[25],具体布置如图3所示。

目前,常见的火源模型有三种,分别为非稳态的 t^2 型火源、稳态火源以及完整型火源模型^[26]。稳

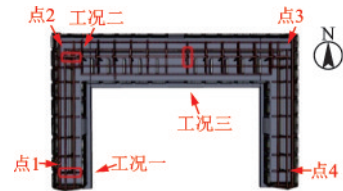


图2 不同火源位置示意

Fig.2 Schematic diagram of the locations of different fire sources

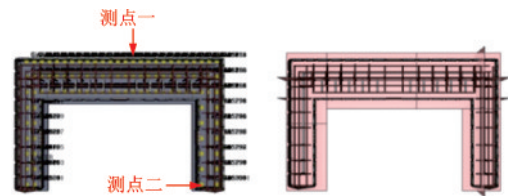


图3 热电偶及切片布置示意

Fig.3 Schematic diagram of thermocouple and slice arrangement

态型火源是较为简单的火源模型,其所设定的火源热释放速率是一个常数,不随时间的变化而变化的。此类模型可以用来简化复杂的模拟计算过程,近似的认为在点火源开始燃烧后就迅速进入了一个稳定的燃烧阶段,整个过程无法体现出火灾发生后出现的增长以及衰减阶段的变化过程。若选择稳态火源进行模拟研究可能会出现较大误差,只能够用来进行较为粗略的估算。非稳态火源是运用较为广泛的一类火源模型。它代表火源的热释放速率为时间的函数,在不同的火灾场景下,随着火灾的发生发展,火源的热释放速率总是随着时间的变化而变化的。 t^2 火是最著名的非稳态火源模型,可以真实还原出火灾在燃烧过程中的孕育期、增长期以及衰减期,在数值模拟中应用最为常见。

本文采用非稳态 t^2 火源模型,将火源热释放速率设定为 $4\ 000\text{ kW}$,在查阅大量文献后发现^[27],此速率为最符合本建筑环境和现场条件的数据。由于古建筑内木材风化程度较高,导致含水率偏低、极易燃烧,因此在数值模拟时,火源点选择快速增长型,取 $\alpha=0.046\ 89\text{ kW}/\text{m}^2$ 。依据“15分钟消防时间”,简单来说就是从发现起火到消防员开始出水扑救需要15分钟,而古建筑作为游览景区,周边环境复杂,人流量大,道路狭窄,因此将模拟时长设定为 $1\ 000\text{ s}$ 进行研究。最终,经过收集修缮用的木材并实测燃烧数据、实地调研及火灾荷载计算等步骤,对模型中材料的选择、材料的热物理参数进行设置,详细参数设置见表1。

表1 凹型古建筑火灾蔓延模拟基本参数设置

Table 1 Basic parameter settings for fire spread simulation of concave ancient buildings

模型内容		参数设置			
木构件	黄松	类型	WOOD	材料形式	Layered
		密度	505.3 kg/m ³	燃烧热	1.6E+4 kJ/kg
		比热容	1.36 kJ/(kg·K)	导热系数	0.13 W/(m·K)
		辐射率	0.9	吸收系数	5.0E+4 1/m
		热解参考温度	150 °C	热解升温速率	5K/min
		热解温度范围	80 °C	CO YIELD	0.008 7
		CO ₂ YIELD	1.02	SOOT YIELD	0.012 8
		PKHRR	111.77 kW/m ²	Thickness	0.02 m
青砖、石碑	耐火砖	类型	FIRE BRICK		
		材料形式	Layered(1.0 FIRE BRICK)		
		尺寸	0.25 m×4 m		
火源设置	火源功率	4 000 kW/m ²			
	火灾增长模型	t ²			
模拟时间	1 000 s				

2 结果与讨论

2.1 热释放速率的变化

火灾的燃烧强度通常用热释放速率表示,其大小与单位时间内材料燃烧所释放的热量呈正相关。图4展示了不同火源位置下凹型古建筑在火蔓延过程中热释放速率随时间的变化曲线。

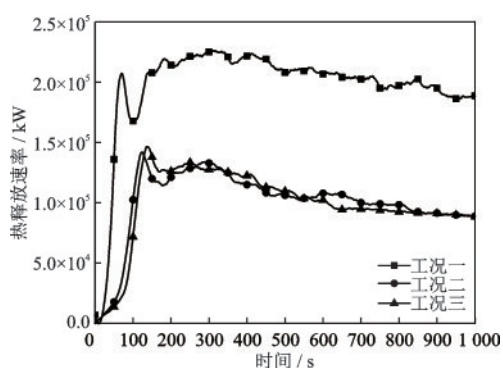


图4 不同火源位置热释放速率变化曲线

Fig.4 Heat release rate change curve at different ignition locations

三个工况的热释放速率均先急速增长,后逐渐趋于平稳。从工况一的曲线中可看出,热释放速率在50 s之前呈指数增长,最高时可达225 MW,

50 s后出现突然下降,之后缓慢上升趋于平稳。不同之处在于,与工况一相比,工况二、三的热释放速率上升到最高点所需的时间较长,大约在130 s达到最高点,且增长幅度较低。

从火灾发生发展规律来看,建筑内一旦起火,火灾呈现初起阶段,在氧气充足的情况下出现急剧增加的过程,火势蔓延迅速,致使室内温度极速升高,对人员撤离造成极大影响。由于增长期内消耗了大量氧气,导致室内氧气供应不足,一些可燃物燃烧受到阻碍,因此,热释放速率在燃烧过程中出现突然下降,之后缓慢上升趋于平稳。工况一处于凹型建筑的西南角,热量易存储,顺流火蔓延速度加快,使其成为三个工况中热释放速率增长最快,增幅最大的一个火源点位置,这为人员撤离时间提供了上限。工况二、三由于距离出口位置较近,在凹型建筑中通风条件良好,与外界持续进行对流散热,因此,热释放速率上升较为缓慢,延长了人员疏散时间。

2.2 室内温度场的变化规律

由于1.67 m为我国国民的平均身高^[25],且建筑内参观人员可出现在建筑内的任何地方,考虑到模拟的实际情况,故在此处设置切片展开研究。如图5~7所示,展示了三个工况在1.67 m高处及火源点位置的最高温度切片。

图5(a)展示了工况一在1.67 m高处的温度分

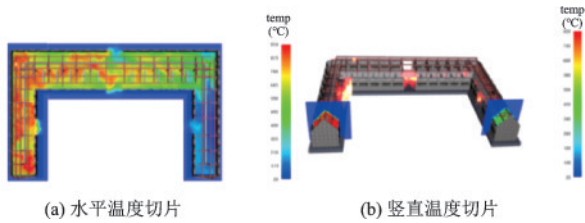


图5 工况一1.67 m水平温度切片与火源点竖直温度切片示意

Fig.5 Schematic diagram of 1.67 m horizontal temperature slice and vertical temperature slice at the ignition source (case 1)

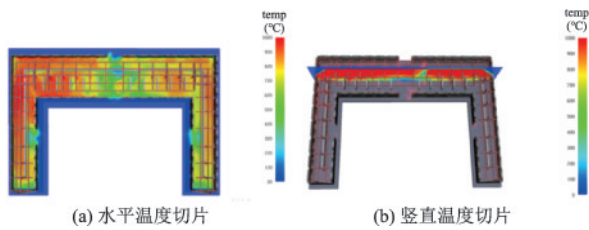


图6 工况二1.67 m水平温度切片与火源点竖直温度切片示意

Fig.6 Schematic diagram of 1.67 m horizontal temperature slice and vertical temperature slice at the ignition source (case 2)

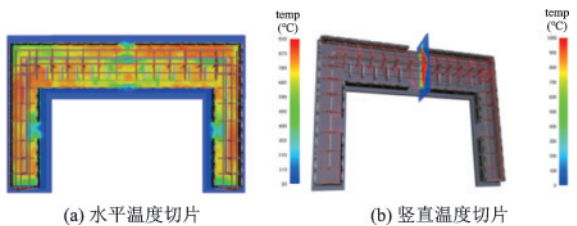


图7 工况三1.67 m水平温度切片与火源点竖直温度切片示意

Fig.7 Schematic diagram of 1.67 m horizontal temperature slice and vertical temperature slice at the ignition source point (case 3)

布,可以看出火灾蔓延到125 s时,火源点附近垂直高度1.67 m处温度达到970℃,东北方向转角(图2“点3”处)温度达400℃;从图5(b)可以看出,在火源点开始燃烧后,温度持续升高,火灾燃烧模拟到68 s时,火源点温度达到了820℃,是工况一整个模拟过程中火源点处的最高温度。

由上可知,火灾发生约2 min后,火势不仅蔓延至了西北方向拐角,东北方向拐角温度已高达400℃,也远高于人体所能接受的极限116℃,这为人员撤离时间限定了上限;尽管纵向走廊的长度短于横向走廊长度,但被火势完全蔓延所用时间最短

的为横向走廊,这主要是由于横向走廊有开启状态的门,在火风压的影响下屋外新鲜空气涌入,加速了火势蔓延;约1 min后火源点温度已经足够对建筑的结构稳定性产生威胁^[28],随时可能会出现坍塌风险,这为消防救援时间限定了上限。因此,火灾发生2 min内,室内人员应疏散完毕,2 min后火源点附近的纵向走廊已高达970℃,该区域消防员进行灭火救援时也不宜进行内攻。

图6(a)展示了工况二在1.67 m高处的温度分布,可以看出火灾蔓延到244 s时,垂直高度1.67 m处的最高温度达到1 000℃,主要出现在建筑的西北角(图2“点2”处),且凹型建筑内已开始全面燃烧;较多研究和文献表明,在火灾初起的5 min内,是火灾扑救和人员疏散的“黄金期”^[29]。从图6(b)可以看出,在火源点开始燃烧后,温度持续升高,火灾燃烧模拟到89 s时,火源点温度达到了1 000℃,是工况二整个模拟过程中火源点处的最高温度。

由此可得,火灾发生4 min后,火焰已经蔓延至建筑东南角(图2“点4”处),其温度也已高达600℃,火源点周围由于燃烧时间较长,温度普遍高达1 000℃。横向走廊的两个通风口处温度较低,这是由于此处有屋外新鲜空气涌入,可进行对流散热,致使温度有所降低;也因存在火风压,造成通风口东侧的温度低于西侧。此时凹型建筑的西侧走廊随时有可能发生坍塌风险。因此,发现起火时,人员应在4分钟内进行安全疏散。

图7(a)展示了工况三在1.67 m高处的温度分布,可以看出火灾蔓延到220 s时,垂直高度1.67 m处的最高温度达到1 000℃,室内大面积燃烧,最低温度高达500℃,这为人员撤离时间限定了上限。因此,为保证人员安全疏散,需在火灾发生后3 min内完成撤离。从图7(b)可以看出,在火源点开始燃烧后,温度持续升高,火灾燃烧模拟到100 s时,火源点温度达到了1 000℃,是工况三整个模拟过程中火源点处的最高温度。

具体分析可知,火灾发生3 min后,火焰已从工况三处蔓延至建筑东南角(图2“点4”处)及西南角(图2“点1”处),其温度也已高达500℃,建筑内全面燃烧,有发生轰燃的可能。因此,在消防救援时应在距离建筑较远的地方使用高压水枪进行灭火,以免轰燃发生后的冲击力对救援人员造成损伤。从模拟过程可以看出,因其凹型建筑的结构特点,相比于两条纵向走廊,火源点向两侧横向走廊蔓延

时速度明显加快;火源点处于相对的两个通风口之间,持续有屋外新鲜空气涌入,进行换热,致使该处温度未达到1000℃。

综上所述,本节主要模拟研究了室内温度场的变化规律,通过分析1.67 m高处建筑内的水平温度及火源点温度,得出三个工况在火灾发生后均有大面积燃烧的情况,且最高温度均在1000℃左右。由于消防员可在1000℃的火场内停留30 s^[30],因此,当该建筑内发生火灾并处于全面燃烧时,在保证建筑结构稳定的前提下,消防员可利用30 s的时间进行内攻,实施灭火。不同之处在于,工况三的火源点由于处在通风口处能够与外界进行及时换热,其该点处的温度未达到建筑内的最高温度,但建筑内的其他地方发生了大面积燃烧,随时可能发生轰燃。同时,通过深入分析,阐述了此类建筑火灾扑救方案的高效制定、人员黄金疏散时间以及防灭火装置的合理排布提供参考依据。

2.3 CO₂和CO浓度变化

木材在燃烧过程中会产生CO、CO₂等气体,当烟气中的含氧量低于正常所需的数值时,人的活动能力减弱、智力混乱,甚至晕倒窒息;当烟气中含有各种有毒气体的含量超过人正常生理所允许的最低浓度时,就会造成中毒死亡。图8、9是三个工况在建筑物正北方向及东南角两个测点处CO₂浓度随时间的变化规律(测点具体布置如图3所示)。

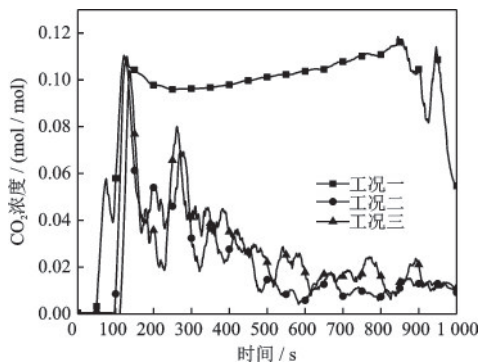


图8 测点1 CO₂浓度随时间的变化曲线

Fig.8 Curve of CO₂ concentration over time at measurement point 1

图8可以看出,工况一在测点1处,50 s之前的CO₂浓度几乎为0,50 s之后呈直线上升,CO₂浓度达到0.11 mol/mol后缓慢增加,直至达到该过程中的最大值0.12 mol/mol后,才突然降低。工况二、三

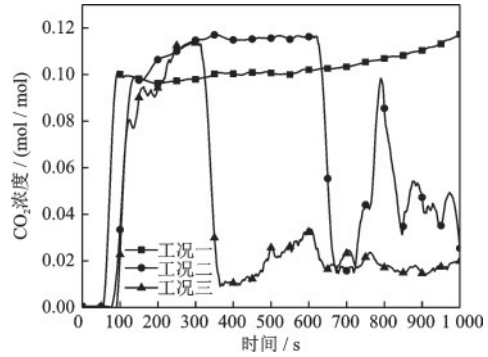


图9 测点2 CO₂浓度随时间的变化曲线

Fig.9 Curve of CO₂ concentration over time at measurement point 2

在100 s后呈指数增加,增长至0.11 mol/mol(最大值)后持续降低。

这主要是由于,火灾初期CO₂的生成量较少,烟气从火源点位置还未扩散至测点1。工况一突然降低是因为木材在大量燃烧之后,建筑内氧气不足,无法进行完全燃烧。较于工况一,工况二、三由于距通风口较近,烟气极易向外流出,因此,浓度曲线会持续下降。

在整个过程中,可以明显看出工况一中的CO₂浓度最高,且持续上升,这是由于工况一所处的位置距通风口较远,烟气容易聚集,造成CO₂浓度持续升高。

图9可以看出,工况一在直线上升后持续升高,未出现下降趋势,模拟至1000 s时,CO₂浓度达到0.12 mol/mol,相较于工况一,工况二、三出现升高后突然降低的现象,最高时CO₂浓度同样达到0.12 mol/mol,最低时浓度为0.01 mol/mol。

由上可知,测点2处于较为封闭的位置,当工况一产生的烟气流动到测点2后发生烟气集聚,致使测点2处的CO₂浓度不断升高,工况二、三发生火灾100 s后,测点2才检测出CO₂浓度。

也可发现,图9中工况一相较于工况二、三,曲线波动较小,在瞬时增加后,平稳上升,原因在于所处位置,烟气流动较慢。

通过对比两个测点处的CO₂浓度,可得测点二在三个工况中集聚的CO₂含量最高,因此,应在该测点位置设计多个感烟探测器,用于建筑的火灾防范。

图10、11展示了三个工况在两个测点CO浓度随时间的变化规律(测点具体布置如图3所示)。CO的产生是建筑内可燃物在燃烧过程中由于缺少

氧气供应,未进行充分燃烧所得,通常来说,若室内CO浓度达到一定阈值,人体就会出现头晕、恶心、甚至死亡的严重后果。从两幅曲线图中可以看出,两个测点在70 s之前CO生成量均为0,这是由于火源点在着火初期,空气含量供应充足,可燃物得到充分燃烧而未生成CO。因此,70 s可作为火灾发生时,人员疏散的最佳时间及救援人员内攻的黄金时间。相较于工况二、三,工况一在两个测点的CO浓度最大,最大时可达 1.1×10^{-3} mol/mol。工况一在两个测点的变化趋势与工况二、三不同,主要由于其所处位置距通风口较远,烟气流动较慢,造成烟气集聚。从图10中可发现,工况二、三在达到最大值后持续降低,最低达到 0.5×10^{-4} mol/mol,这是由于该段时间,建筑内可能发生轰燃,可燃物进行了完全燃烧。可见,与测点一相比,当火源位置处于建筑西南角时(测点二处),建筑内有大量CO气体集聚,严重威胁人员的生命安全,加大救援难度;因此,可在测点二处设置多个CO探测器,在起火时用于火灾报警,帮助室内人员及时疏散。

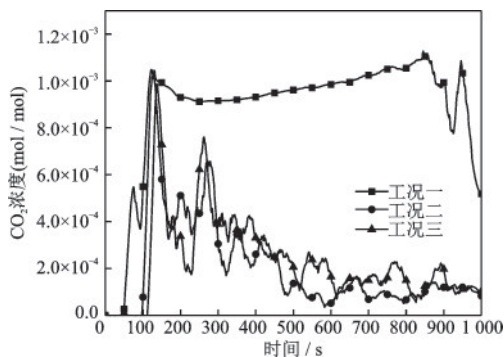


图10 测点1 CO浓度随时间的变化曲线

Fig.10 CO concentration change curve over time at measurement point 1

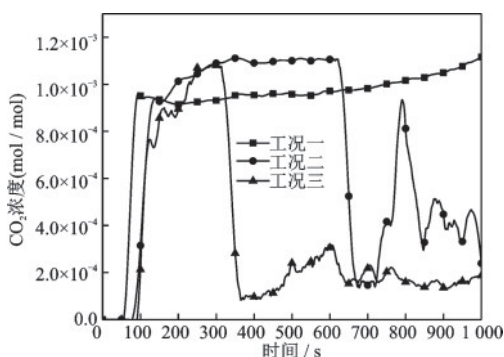


图11 测点2 CO浓度随时间的变化曲线

Fig.11 CO concentration change curve over time at measurement point 2

综上,本节研究了火灾发生时,室内CO₂和CO的浓度变化,通过分析每个工况中两个测点处的CO₂浓度,可发现,工况二、三中烟气流动至两个测点处的时间较工况一延迟了50 s左右,工况一CO₂浓度最大可达到0.12 mol/mol,通过分析每个工况中两个测点处的CO浓度,可发现,工况二、三中CO浓度在测点1持续降低,最低可达到 0.5×10^{-4} mol/mol,工况一在两个测点处的CO浓度最大均可达到 1.1×10^{-3} mol/mol,可见三个工况对浓度大小影响很大。同时,所得相应结果亦为消防预警装置的布置、消防救援人员内攻及被困人员状态预判提供参考依据。

3 结 论

根据对西安市某博物馆内一凹型古建筑开展实地调研、数据采集、模型搭建及修正、火灾模拟等工作,分析了不同火源位置对火灾蔓延规律的影响,所得结论如下:

(1)凹型古建筑作为结构特殊的一类,火灾发生时燃烧速度快,烟雾生成量大,消防救援难度加大,亟需制定专门的消防行为规范及火灾防控对策。

(2)模拟分析了凹型古建筑火灾发展过程中的热释放速率、温度等参数,可得前期蔓延速度较慢;发现因其建筑结构特点,当火焰蔓延至横向走廊时,蔓延速度迅速增长。

(3)对于建筑内无容载可燃物的凹型建筑而言,火源点处于建筑西南角时,热释放速率最大,火灾发生50 s后,建筑内热量为225 MW;在1.67 m高处的水平温度达到1 000 °C;CO气体集聚,严重威胁人员的生命安全。当火源点处于正北方向相对的两个通风口处时,对于整个建筑内部来说,此处由于热量得到及时释放,温度较低,但随时有发生轰燃的可能。

(4)火灾发生前,应在建筑正北方向设置多个感烟探测器,在建筑西南角及东南角设置多个感温探测器及自动喷淋系统;火灾发生后,当火源位置处于建筑西南角时,室内人员应在2 min内疏散完毕,2 min后,消防员进行灭火救援时也不宜进行内攻。

(5)通过研究火源位置对凹型砖木结构古建筑火蔓延特性的影响,可为将来研究古建筑群的火灾发生发展过程奠定理论基础。

参考文献:

- [1] 任霄. 论古建筑文物保护工作的重要意义和路径[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2022(15): 52-55.
Ren X. On the significance and path of the protection of ancient architecture and cultural relics [J]. Cultural Relics Identification and Appreciation, 2022(15): 52-55. (in Chinese)
- [2] 韩雷. 基于FDS的古寺庙大殿火灾模拟研究[J]. 消防技术与产品信息, 2018, 31(7): 5-8.
Han L. Fire simulation study of ancient temple hall based on FDS [J]. Fire Technology and Product Information, 2018, 31(7): 5-8. (in Chinese)
- [3] 袁春燕, 郑高凯, 郎雨佳, 等. 考虑不同场景的砖木结构古建筑火灾特征研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(10): 158-164.
Yuan C Y, Zheng G K, Lang Y J, et al. Study on fire characteristics of brick and wood structure ancient buildings considering different scenarios [J]. China Safety Production Science and Technology, 2019, 15(10): 158-164. (in Chinese)
- [4] 苏心伟. 古建筑火灾危险性分析及灭火救援对策[J]. 山西建筑, 2022, 48(11): 175-178.
Su X W. Fire hazard analysis of ancient buildings and countermeasures for fire extinguishing and rescue [J]. Shanxi Jianjian, 2022, 48(11): 175-178. (in Chinese)
- [5] 刘芳, 怀超平, 李竞炭. 木结构古建筑室内火灾发展的数值分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(9): 299-304.
Liu F, Huai C P, Li J J. Numerical analysis of indoor fire development of ancient buildings with wood structure [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(9): 299-304. (in Chinese)
- [6] 石磊, 韩佳倪, 柳思勉, 等. 砖木结构古建筑群火灾蔓延及人员疏散模拟研究[J]. 中外建筑, 2021(2): 184-189.
Shi L, Han J N, Liu S M, et al. Simulation study on fire spread and evacuation of people in ancient brick and wood buildings [J]. Chinese and Foreign Architecture, 2021(2): 184-189. (in Chinese)
- [7] Bartlett A I, Hadden R M, Hidalgo J P, et al. Auto-extinction of engineered timber: Application to compartment fires with exposed timber surfaces [J]. Fire Safety Journal, 2017, 91: 407-413.
- [8] 孙贵磊, 王璐瑶. 基于Pyrosim的古建筑火灾蔓延规律分析[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(2): 214-218.
Sun G L, Wang L Y. Analysis of fire spread law of ancient buildings based on Pyrosim [J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(2): 214-218. (in Chinese)
- [9] Emberley R, Putynska C G, Bolanos A, et al. Description of small and large-scale cross laminated timber fire tests [J]. Fire Safety Journal, 2017, 91: 327-335.
- [10] 权茹月. 华清宫火灾风险特征及消防安全评估[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
Quan R Y. Fire risk characteristics and fire safety assessment of Huaqing Palace [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [11] 张盛东, 黄承辉, 刘静. 燃烧后木材顺纹抗压性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(4): 730-733, 738.
Zhang S D, Huang C H, Liu J. Experimental study on the compressive properties of wood after combustion [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(4): 730-733, 738. (in Chinese)
- [12] 许清风, 徐强, 李向民. 木结构火灾性能研究进展[J]. 四川建筑科学研究, 2011, 37(4): 87-92.
Xu Q F, Xu Q, Li X M. Research progress on fire performance of wood structure [J]. Sichuan Building Science, 2011, 37(4): 87-92. (in Chinese)
- [13] 高先占. 云南省木结构民居火灾蔓延研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
Gao X Z. Study on the spread of fire in wooden houses in Yunnan Province [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [14] 怀超平. 木结构文物建筑火灾蔓延特性研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
Huai C P. Study on the fire spread characteristics of wood structure cultural relics buildings [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020. (in Chinese)
- [15] Bullock M, Lennon T, Enjily V. The fire resistance of medium-rise timber frame buildings summary report [R]. Manchester: University Manchester, 2000.
- [16] Tung S F, Su H C, Tzeng C T, et al. Experimental and numerical investigation of a room fire in a wooden-frame historical building [J]. International Journal of Architectural Heritage, 2020, 14(1): 106-18.
- [17] 潘晓菲, 吕品. 凹型建筑外立面火灾烟气蔓延特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(2): 45-51.
Pan X F, Lyu P. Study on the propagation characteristics of fire flue gas on the facade of concave building [J]. China Safety Production Science and Technology, 2018, 14(2): 45-51. (in Chinese)
- [18] 王宇, 张敬义, 李世鹏. 侧墙建筑羽流火焰高度计算公式及其影响因素研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(5): 1799-1804.
Wang Y, Zhang J Y, Li S P. Study on the calculation formula of feather flame height and its influencing fac-

- tors in side wall buildings[J].Journal of Safety and Environment,2018,18(5):1799-1804.(in Chinese)
- [19] 张玉涛,张玉杰,李亚清.凹型结构建筑外立面火灾蔓延特性模拟研究[J].中国安全科学学报,2020,30(8):70-78.
Zhang Y T,Zhang Y J,Li Y Q.Simulation study on fire propagation characteristics of façade of concave structure building[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2020,30(8):70-78.(in Chinese)
- [20] 杨舜博.火灾环境下凹型高层建筑羽流火焰的数值模拟研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2019.
Yang S B. Numerical simulation of plume flame of concave high-rise building under fire environment[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2019.(in Chinese)
- [21] 高金达.凹型结构下外墙保温材料EPS火蔓延实验及数值模拟研究[D].马鞍山:安徽工业大学,2021.
Gao J D.EPS fire propagation experiment and numerical simulation study of external wall insulation material under concave structure [D].Maanshan: Anhui University of Technology, 2021.(in Chinese)
- [22] 石磊,韩佳倪,柳思勉,等.砖木结构古建筑群火灾蔓延及人员疏散模拟研究[J].中外建筑,2021(2):184-189.
Shi L,Han J N,Liu S M ,et al.Simulation study on fire spread and evacuation of people in ancient brick and wood buildings [J]. Chinese and Foreign Architecture, 2021(2):184-189.(in Chinese)
- [23] 尹越,周汝,何嘉鹏,等.风速对高层建筑凹型外墙火灾烟气扩散的影响[J].消防科学与技术,2020,39(5):618-623.
Yin Y,Zhou R,He J P, et al. Effect of wind speed on the diffusion of fire flue gas in concave facades of high-rise buildings[J].Fire Science and Technology,2020,39(5):618-623.(in Chinese)
- [24] 陈旭.古建筑电气火灾防控与管理的探讨[J].智能建筑电气技术,2020,14(1):72-74.
Chen X. Discussion on electrical fire prevention and control and management of ancient buildings[J]. Intelligent Building Electrical Technology, 2020, 14(1): 72-74.
(in Chinese)
- [25] 腾讯网.中国男女的平均身高[EB/OL].(2022-5-23) [2022-10-19].<https://new.qq.com/rain/a/20220523A0AOC400>.
Tencent.com. Average height of men and women in China [EB/OL]. (2022-5-23) [2022-10-19]. <https://new.qq.com/rain/a/20220523A0AOC400>.(in Chinese)
- [26] 王皎,高扬.基于火灾动力学模拟的古建筑火灾探测器布置研究[J].中国安全科学学报,2011,21(3):71-76.
Wang J,Gao Y. Study on the arrangement of ancient building fire detector based on fire dynamics simulation [J].Chinese Journal of Safety Science,2011,21(3):71-76.(in Chinese)
- [27] 孙贵磊,王璐瑶.基于Pyrosim的古建筑火灾蔓延规律分析[J].消防科学与技术,2016,35(2):214-218.
Sun G L,Wang L Y. Analysis of fire spread law of ancient buildings based on Pyrosim [J]. Fire Science and Technology,2016,35(2):214-218.(in Chinese)
- [28] 方之龙.建筑结构火灾下倒塌监测及预警技术[J].消防科学与技术,2021,40(10):1555-1558.
Fang Z L. Collapse monitoring and warning technology of building structure under fire [J]. Fire Science and Technology,2021,40(10):1555-1558.(in Chinese)
- [29] 高新华,严文芳.民用建筑火灾发生初期扑救与疏散“5min黄金时间”理论探讨[J].消防界,2019,5(10):29-30.
Gao X H, Yan W F. Discussion on the theory of "5min golden time" for fighting and evacuation in the early stage of civil building fires [J]. Fire Protection Circle, 2019,5(10):29-30.(in Chinese)
- [30] 应急救援展览会.消防避火服性能参数[EB/OL].(2020-10-21) [2022-10-19].<https://www.ciosh.com/news/2323.html>
Emergency Rescue Exhibition. Performance parameters of fire protection clothing [EB/OL]. (2020-10-21) [2022-10-19]. <https://www.ciosh.com/news/2323.html>.(in Chinese)

(本文编辑:张艺)