

不同风速条件下村镇木结构建筑防火间距的数值模拟研究

谷凡,张玉玉,姜喻涵,谷池,南宇

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 探究风速对木结构建筑防火间距的影响规律,为我国村镇木结构建筑火灾防治提供参考。方法 采用 PyroSim 火灾动态模拟软件对西南地区典型穿斗式木结构建筑的火灾发展过程进行数值模拟,探索不同风速条件下的温度、热辐射通量密度的变化规律,揭示风速对木结构建筑防火间距的影响规律。结果 数值模拟计算结果表明:当燃烧时间为 600 s 时,木结构建筑进入燃烧充分发展阶段,且起火房间上方处的温度和热辐射通量密度值最高。木结构建筑防火间距随着风速的增加而增加,且在风速为 4 m/s 时出现极大值;当风速高于 4 m/s 时,热量加剧扩散并导致防火间距出现降低的趋势;对于采用不同品种建筑木材建造的木结构建筑,当风速为 0~5 m/s 时,数值模拟计算的木结构建筑防火间距值为 4.24~8.22 m。结论 综合考虑地形、地势以及大气环境等不确定因素的影响,西南地区村镇木结构建筑的防火间距应大于 12 m。

关键词 木结构建筑;防火间距;风速;数值模拟

中图分类号 TU366.2 文献标志码 A

Numerical Simulation Analysis of Fire Separation Distance of Rural Timber Structure Buildings under Different Wind Speeds

GU Fan, ZHANG Yuyu, JIANG Yuhuan, GU Chi, NAN Yu

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: To provide reference for the fire prevention and control of timber structure buildings in villages and towns in southwest China, the influence of wind speed on the fire separation distance of timber structure buildings was explored. Using PyroSim fire dynamic simulation software, the fire development process of typical chuan-dou type timber structure building was numerically

收稿日期:2021-10-12

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD1100403);辽宁省科技厅科技计划项目(2019-ZD-0299);辽宁省教育厅科学研究项目(Lnjc201906)

作者简介:谷凡(1973—),男,副教授,博士,主要从事结构工程和工程力学方面研究。

simulated, and the influence of wind speed on the temperature, the thermal radiation flux density and the fire separation distance of timber structure buildings was revealed. Simulation results show that when the burning time reaches 600 s, the timber structure building enters the stage of full combustion development, and the temperature and thermal radiation flux density above the burning room are the highest. The fire separation distance of timber structure buildings increases with the increase of wind speed, and the maximum value appears when wind speed is 4 m/s. When the wind speed is higher than 4 m/s, heat intensifies diffusion and leads to appear a trend of decreasing fire separation distance. When the wind speed is 0 ~ 5 m/s, the numerical simulation results show that the fire separation distance of timber structure buildings built with different types of wood is 4.24 ~ 8.22 m. Considering the influence of uncertain factors such as terrain, topography and atmospheric environment, the fire separation distance of rural timber structure building in southwest China should be greater than 12 m.

Key words: timber structure building; fire separation distance; wind speed; numerical simulation

我国西南地区村镇木结构建筑之间多为檐廊相接,一旦发生火灾,容易出现“火烧连营”的现象,存在极大的火灾隐患。因此,对我国村镇木结构建筑防火间距的研究尤为重要^[1-4]。目前,国内外学者在木结构建筑火灾方面进行了相关研究^[5-12]。周强^[13]对不同热流条件下三种木材的外形变化趋势进行了试验研究。A. Menis^[14]对无保护交互叠放型木楼板进行了耐火性试验研究。S. F. Tung^[15]对全尺寸木结构建筑模型进行了火灾试验研究,探究了木结构建筑的室内火灾发展规律和蔓延规律。李思禹^[16]对文物古建筑物的火灾危险性及抗火性能进行了研究。怀超平^[17]采用 FDS 软件对木结构文物古建筑物的火灾蔓延规律及其影响因素进行了数值模拟研究。韩雷^[18]采用 FDS 软件对古寺庙大殿的火灾蔓延过程进行了数值模拟研究,针对温度、烟气变化等情况,提出文物古建筑的火灾防控措施。王雁楠^[19]采用 FDS 软件对木结构建筑间火灾蔓延进行了数值模拟研究,指出建筑间距和风速是影响火灾蔓延的主要因素。关于木结构建筑火灾方面的研究,多局限于木材耐火性能和木结构建筑室内火灾蔓延等方面,而关于村镇木结构建筑间的火灾蔓延规律以及防火间距的研究相对薄弱。影响木结构建筑防火间距的因素包括起火建筑的火灾荷载、建筑群的整

体布局和大气环境等因素,其中风速的影响应予以重点关注。基于此,笔者对不同风速条件下的木结构建筑间的火灾蔓延规律进行数值模拟研究,探索风速对木结构建筑防火间距的影响规律。研究表明:木结构建筑的防火间距随着风速的增加而增加,在风速为 4 m/s 时出现极大值;当风速大于 4 m/s 时,随着风速的继续增加,热量加速扩散,导致防火间距出现降低的趋势。综合考虑地形、地势以及大气环境等各种不确定因素的影响,建议西南地区村镇木结构建筑的防火间距值在 12 m 以上。

1 数值模型

1.1 模型尺寸

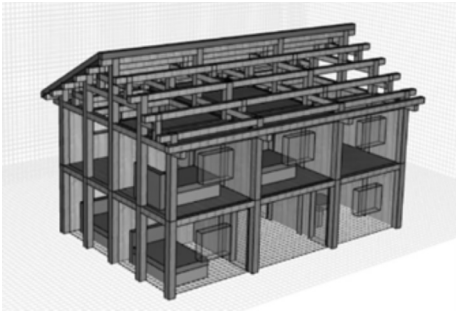
计算模型为西南地区典型的穿斗式木结构建筑,其长×宽×高为 10.3 m×7.6 m×6.5 m。墙外围门、窗洞口宽×高分别为 1.1 m×2.1 m、1.1 m×0.9 m,室内门洞口宽×高为 0.9 m×2.1 m,室内布置床、沙发等家具(火灾荷载),数值模型如图 1 所示。火源位于一层客厅,面积为 0.4 m×0.4 m,模拟着火时间为 1 000 s,燃烧类型为非稳态 t^2 火模式。

1.2 网格划分

网格划分对数值模拟的计算结果具有较大影响,为兼顾计算精度和计算机处理器运



(a)建筑外观图



(b)建筑内视图

图1 穿斗式木结构建筑数值模型

Fig. 1 Numerical model of chuan-dou type timber structure building

行时间,笔者设定模拟计算区域为 $23\text{ m} \times 20\text{ m} \times 8\text{ m}$,并将其划分为两个计算子区域,每个计算子区域按照不同的网格尺寸分别进行独自の网格划分,如图2和表1所示,网格总数为352 640个。

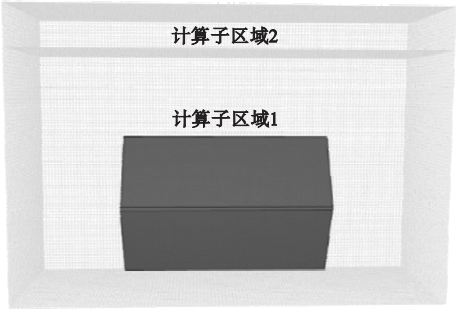


图2 计算子区域的划分

Fig. 2 Division of simulation sub-regions

表1 计算子区域的网格划分

Table 1 Mesh generation of simulation sub-regions

计算子区域编号	子区域网格长×宽×高/m	子区域内网格数量/个	网格总数量/个
1	$0.2 \times 0.2 \times 0.2$	334 080	352 640
2	$0.4 \times 0.4 \times 0.4$	18 560	

1.3 测点布置

在起火建筑物后立面墙体的后方布置热辐射通量计,共计4组。A组、B组热辐射通量计布置在左侧房间窗口处,距地面高度分别为3.0 m、5.0 m;C组、D组热辐射通量计布置在中间房间窗口处,距地面高度分别为3.0 m、5.0 m。每组热辐射通量计包括10个测点,在水平方向上相互间隔0.5 m,如图3所示。此外,在起火建筑物后立面墙体的后方,在距离墙体0.5 m、1.0 m、1.5 m…处,等间距布置竖向温度切片,共计10组,如图4所示。

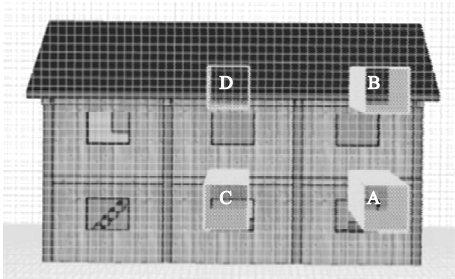


图3 热辐射通量测点布置图

Fig. 3 Layout of thermal radiation flux measuring points

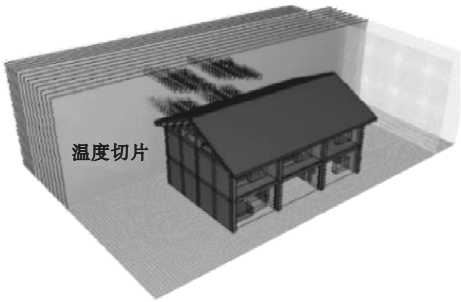


图4 温度切片布置图

Fig. 4 Layout of temperature slices

1.4 工况设置

笔者以西南地区典型城市昆明市的风场特征为代表,研究风速对木结构建筑防火间距的影响规律。根据昆明基准气候站近10年观察数据^[20]得知:昆明市平均风速小于5.0 m/s。为此,建立6种火灾场景分别对应于不同的风速,风速取值分别为0 m/s、1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s和5 m/s,由计算

域的+Y面(即建筑物前立面)吹入,起火建筑物的门窗均设为开启状态。

2 数值模拟结果分析

2.1 场景1

对于场景1,在风速为0 m/s的情况下,当燃烧时间为600 s时,木结构建筑进入燃烧充分发展阶段。若起火建筑物与相邻建筑物距离过近,则极易通过热辐射作用导致相邻建筑物发生火灾,即建筑物之间的火灾蔓

延。选取距离起火建筑物后立面墙体1.0 m、2.0 m、3.0 m、4.0 m的温度切面,得到相应位置处的温度云图,如图5所示。由于起火房间设置在一楼中间房间室内,因此在火灾充分发展阶段,热对流与热辐射作用导致二楼中间房间窗口上方的温度最高。选取该位置处的10个热辐射通量测点值(即图3中的D组热辐射通量测点),可以得到距离起火建筑物后立面墙体不同位置处的热辐射通量密度随时间的变化曲线,如图6所示。

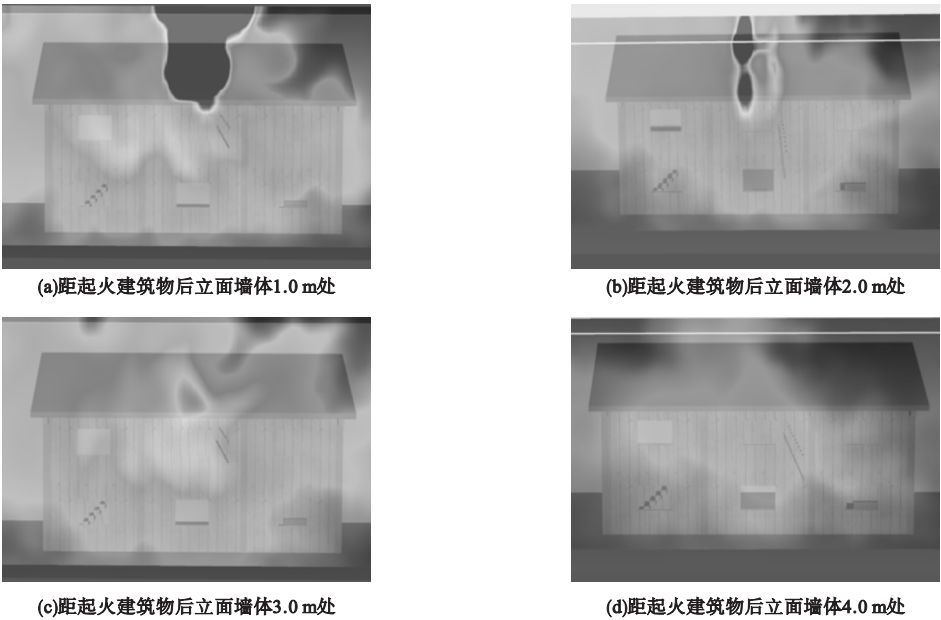


图5 场景1在燃烧时间为600 s时的温度云图

Fig. 5 Temperature contour chart of scene 1 at combustion time of 600 s

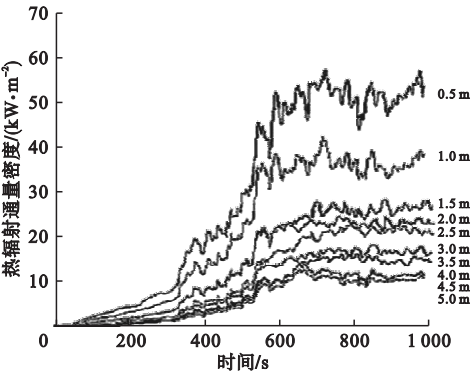


图6 不同位置处的热辐射通量密度随时间的变化曲线

Fig. 6 The variation of thermal radiation flux density with time at different positions

热辐射通量密度随着火灾的发展而逐渐增大,随着与起火建筑物距离的增大而减小;当燃烧时间到达600 s后,各位置处的热辐射通量密度逐渐进入稳定状态。由图6可以获得木结构建筑进入燃烧充分发展阶段时的热辐射通量密度与起火建筑物距离的关系曲线,如图7所示,其拟合公式为

$$E = 36.625x^{-0.618} \tag{1}$$

式中:E为热辐射通量密度,kW/m²;x为与起火建筑物的水平距离,m。

由图7可知:木结构建筑进入燃烧充分发展阶段后,距离起火建筑后立面墙体0.5 m处的平均热辐射通量值约为50 kW/m²,

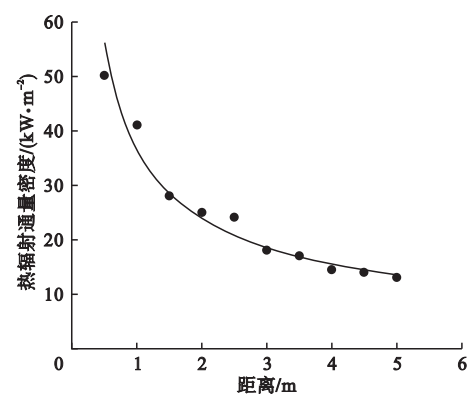


图7 在燃烧充分发展阶段热辐射通量密度与起火建筑物距离的关系(风速为0 m/s)

Fig. 7 Relationship between thermal radiation flux density and the distance to fire building in the full combustion stage(wind speed of 0 m/s)

距离起火建筑后立面墙体5.0 m处的平均热辐射通量值约为13 kW/m²。美国消防协会NFPA 建筑材料防火浸渍木材与防火涂料标准^[21]指出:对于经过防火处理的

建筑木材,当表面热辐射通量密度达到12.6 kW/m²时,木材将被引燃。根据式(1)的拟合公式可以得出:当风速为0 m/s时,木结构建筑的防火间距约为5.62 m。

2.2 场景2—场景6

对于场景2—场景6,即在风速*v*分别为1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s和5 m/s的情况下,木结构建筑进入燃烧充分发展阶段的燃烧时间仍为600 s。当燃烧时间为600 s时,对距离起火建筑物后立面墙体不同距离的10组竖向温度切片所记录的温度云图进行对比分析可知:在二层中间房间窗口上方处的温度值最高。选取该位置处的10个热辐射通量测点值(即图3中的D组热辐射通量测点),可得到距离起火建筑物后立面墙体不同位置处的热辐射通量密度随时间的变化曲线,如图8所示。

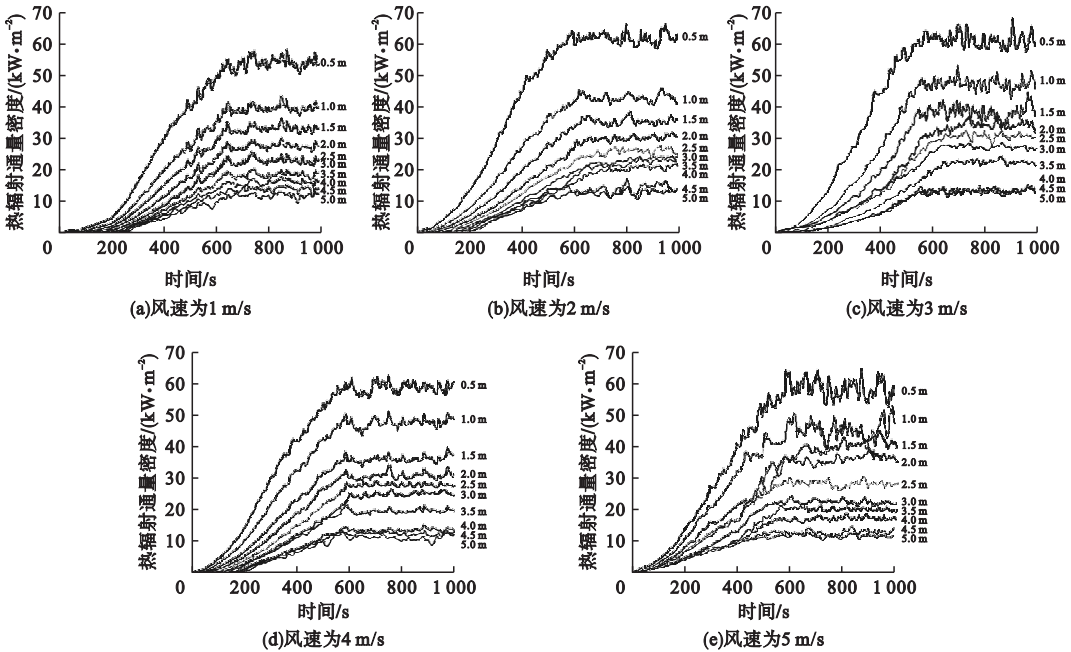


图8 不同位置处的热辐射通量密度随时间的变化曲线

Fig. 8 The variation of thermal radiation flux density with time at different positions

当燃烧时间为600 s时,各位置处的热辐射通量值处于稳定状态,由图8可以获得当木结构建筑进入燃烧充分发展阶段后的热

辐射通量密度与起火建筑物距离的关系曲线,并可以得到相应的拟合曲线与拟合公式,如图9所示。

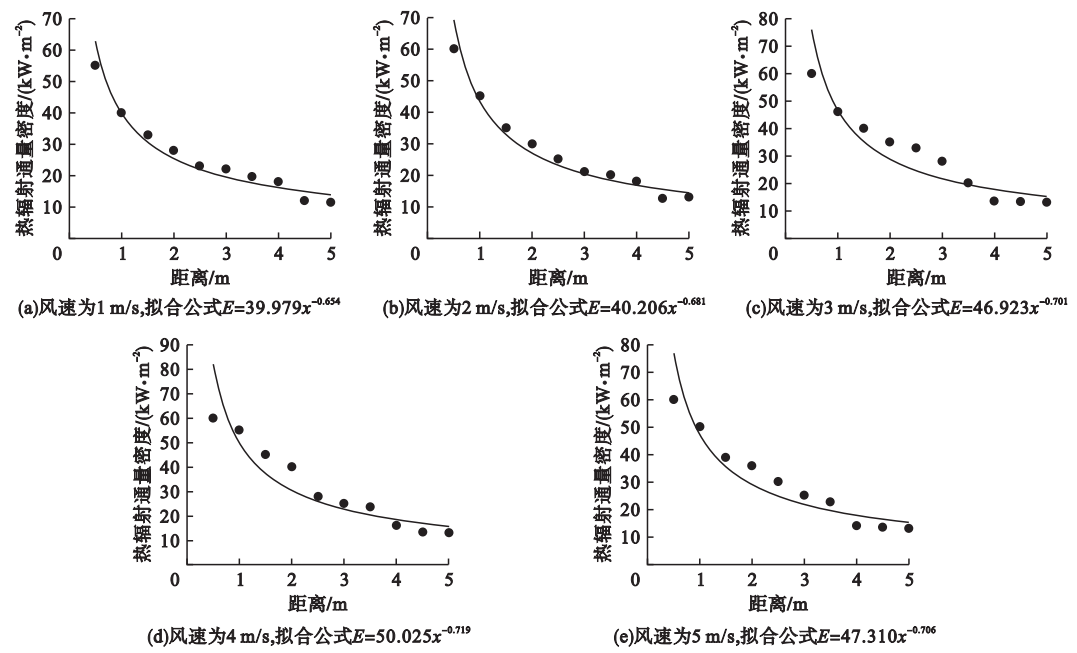


图9 在燃烧充分发展阶段热辐射通量值密度与起火建筑物距离的关系

Fig. 9 Relationship between thermal radiation flux density and the distance to fire building in the full combustion stage

美国消防协会 NFPA 标准^[21]指出:对于经过防火处理的建筑木材,当表面热辐射通量密度达到 12.6 kW/m² 时,木材将被引燃。根据图 9 中的拟合公式可以得出:当风速 v 为 1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s 和 5 m/s 时,木结构建筑的防火间距分别约为 5.84 m、6.11 m、6.52 m、6.81 m 和 6.51 m。

2.3 风速对木结构建筑防火间距影响规律

当燃烧时间为 600 s 时,木结构建筑进入燃烧充分发展阶段,各位置处的热辐射通

量密度值处于稳定状态。若起火建筑物与相邻建筑物距离过近,则极易通过热辐射作用导致相邻建筑物发生火灾,即建筑群体间的火灾蔓延。如前所述,美国消防协会 NFPA 规范指出木材引燃的表面热辐射通量密度判据值为 12.6 kW/m²;此外,吴伟^[22]通过试验指出常用木材引燃的表面热辐射通量密度约为 11.0 ~ 15.0 kW/m²。根据式(1)以及图 9 中的拟合公式,可以得到不同风速条件下的木结构建筑防火间距,如表 2、图 10 所示。

表2 不同风速条件下的木结构建筑防火间距

热辐射通量密度/(kW·m ⁻²)	防火间距/m					
	$v=0$	$v=1.0\text{ m/s}$	$v=2.0\text{ m/s}$	$v=3.0\text{ m/s}$	$v=4.0\text{ m/s}$	$v=5.0\text{ m/s}$
11.0(杉木)	7.00	7.19	7.46	7.92	8.22	7.90
12.0(杉木)	6.08	6.30	6.56	7.00	7.28	6.98
12.6(NFPA)	5.62	5.84	6.11	6.52	6.81	6.51
13.0(杉木)	5.34	5.57	5.83	6.24	6.52	6.23
14.0(杉木)	4.74	4.98	5.23	5.61	5.88	5.61
15.0(红雪松、花旗松)	4.24	4.48	4.73	5.09	5.34	5.09

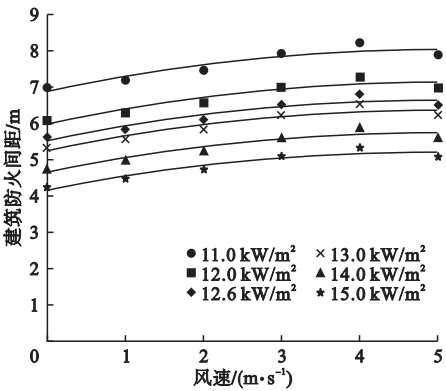


图 10 不同风速条件下的木结构建筑防火间距
Fig. 10 Fire separation distance of timber structure buildings under different wind speeds

木结构建筑间的防火间距随着风速的增加而增加,且在风速为 4 m/s 时出现极大值;当风速大于 4 m/s 时,由于过大的风速会加速热量的扩散,反而会导致防火间距出现降低的趋势。对应于不同的木材,数值模拟计算得到的西南地区木结构建筑防火间距推荐值为 4.24 ~ 8.22 m。按照《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)中的规定,四级民用建筑防火间距为 12 m,综合考虑地形、地势以及大气环境等不确定因素的影响,建议西南地区村镇木结构建筑防火间距值为 12 m 以上。

根据图 10,拟合木结构建筑防火间距与风速的关系(对应于不同木材引燃的表面热辐射通量密度判据值),如式(2)所示。

$d =$

$$\begin{cases} -0.043x^2 + 0.447x + 6.895, E_{cr} = 11.0; \\ -0.045x^2 + 0.450x + 5.897, E_{cr} = 12.0; \\ -0.045x^2 + 0.447x + 5.530, E_{cr} = 12.6; \\ -0.045x^2 + 0.445x + 5.254, E_{cr} = 13.0; \\ -0.044x^2 + 0.433x + 4.664, E_{cr} = 14.0; \\ -0.0437x^2 + 0.424x + 4.169, E_{cr} = 15.0. \end{cases} \quad (2)$$

式中: d 为木结构建筑防火间距, m; x 为风速, m/s; E_{cr} 为木材引燃的表面热辐射通量密度判据值, kW/m²。

3 结 论

(1) 当燃烧时间为 600 s 时,木结构建筑进入燃烧充分发展阶段。热辐射通量密度随起火建筑距离的增加而减小,随风速的增加而增大。当临近木结构建筑物表面热辐射通量密度达到 11.0 ~ 15.0 kW/m² 时,极易通过热辐射效应导致相邻建筑物发生火灾,即建筑物之间的火灾蔓延。

(2) 木结构建筑防火间距随风速的增加而增加,且在风速为 4 m/s 时出现极大值。当风速大于 4 m/s 时,过大的风速加速热量的扩散,导致防火间距出现降低趋势。对于不同品种的木材,数值模拟计算得到的西南地区木结构建筑防火间距推荐值为 4.24 ~ 8.22 m。综合考虑《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)以及各种不确定因素的影响,取安全系数 1.5,建议西南地区村镇木结构建筑防火间距值为 12 m 以上。

参考文献

[1] 翟滢莹,叶雁冰,马黎进,等. 侗族吊脚楼建筑防火间距的数值模拟研究[J]. 广西科技大学学报, 2019, 30(2): 66-71.
(ZHAH Yingying, YE Yanbing, MA Lijin, et al. Study on fire prevention spacing of stilted houses in Dong village with numerical analysis [J]. Journal of Guangxi university of science and technology, 2019, 30(2): 66-71.)

[2] 鄢银连,相华江,解志勇,等. 基于 PyroSim 的木结构建筑防火间距探讨[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(8): 1091-1093.
(YAN Yinlian, XIANG Huajiang, XIE Zhiyong, et al. Discussion on fire-proof distance of wood structural buildings based on PyroSim [J]. Fire science and technology, 2019, 38(8): 1091-1093.)

[3] 龙孜蕊. 古商业街木结构建筑防火间距的数值模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
(LONG Wenen. Numerical simulation study on fire separation distance of wooden structure buildings in ancient commercial street [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.)

[4] 李雪进,李炎锋,褚利为,等. 某侗族村镇木结构建筑火灾实验研究[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(1): 30-32.
(LI Xuejin, LI Yanfeng, CHU Liwei, et al.

- Experimental study of wooden structure building fire of a Dong nationality town [J]. Fire science and technology, 2018, 37(1): 30 – 32.)
- [5] SCHMID J, FRANGI A. Structural timber in compartment fires-the timber charring and heat storage model [J]. Open engineering, 2021, 11(1): 435 – 452.
- [6] SHNAL T, POZDIEIEV S, SIDNEI S, et al. Determination of the charring rate of timber to estimate the fire resistance of structures at real temperature modes of fires [J]. Lecture notes in civil engineering, 2021, 100: 409 – 418.
- [7] 袁春燕, 郎雨佳, 王坤, 等. 砖木结构古建筑不同风速下火灾蔓延规律研究 [J]. 消防科学与技术, 2021, 40(5): 643 – 648.
(YUAN Chunyan, LANG Yujia, WANG Kun, et al. Analysis on the fire spread law of brick-wood structured ancient buildings under different flow velocity [J]. Fire science and technology, 2021, 40(5): 643 – 648.)
- [8] 蔡炎. 火灾下村镇建筑木梁安全性能演化规律研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
(CAI Yan. Study on the evolution of the safety of timber beams in villages and towns buildings under fire [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.)
- [9] SULC S, SMILAUER V, WALD F. Thermal model for timber fire exposure with moving boundary [J]. Materials, 2021, 14(3): 1 – 10.
- [10] JESSOP D, ABU A, WADE C, et al. Performance of a light timber-framed compartment in natural fire subjected to lateral load [J]. Fire and materials, 2019, 43(2): 175 – 188.
- [11] 田垚, 常可可, 李奥. 基于 FDS 的古建筑火灾发展过程研究 [J]. 消防科学与技术, 2019, 38(1): 101 – 104.
(TIAN Yao, CHANG Keke, LI Ao. Study on fire development process of ancient building based on FDS [J]. Fire science and technology, 2019, 38(1): 101 – 104.)
- [12] 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 Guilei, WANG Luyao. Analysis of ancient building fire spreading law based on PyroSim [J]. Fire science and technology, 2016, 35(2): 214 – 218.)
- [13] 周强, 方梦祥. 木材在热解与燃烧中几何特性的变化 [J]. 燃烧科学与技术, 2015, 21(1): 54 – 59.
(ZHOU Qiang, FANG Mengxiang. Structural deformation of woody slab during pyrolysis and combustion [J]. Journal of combustion science and technology, 2015, 21(1): 54-59.)
- [14] MENIS A, FRAGIACOMO M, CLEMENTE I. Fire resistance of unprotected cross-laminated timber floor panels: parametric study and simplified design [J]. Fire safety journal, 2019, 107: 104 – 113.
- [15] 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: conservation, analysis and restoration, 2020, 14(1): 106 – 118.
- [16] 李思禹. 文物建筑火灾蔓延分析及抗火性能研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
(LI Siyu. Fire spread analysis and fire resistance of historic buildings [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.)
- [17] 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.
(HUI Chaoxing. Research on fire spreading characteristics of timber-framed cultural relic building [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.)
- [18] 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 Lei. Simulation of the main hall fire in ancient temple based on FDS [J]. Fire technique and products information, 2018, 31(7): 5 – 8.)
- [19] 王雁楠, 邱洪兴. 基于 FDS 的古建群落火灾蔓延规律数值分析 [J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(6): 26 – 32.
(WANG Yannan, QIU Hongxing. Numerical analysis of spreading law of ancient timber building group fire based on FDS [J]. China safety science journal, 2014, 24(6): 26 – 32.)
- [20] 杨燕妮, 吕静. 昆明风场特征与风能资源分析评估 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2020(4): 26.
(YANG Yanni, Lü Jing. Analysis and evaluation of wind field characteristics and wind energy resources in Kunming [J]. Theoretical research in urban construction, 2020(4): 26.)
- [21] National Fire Protection Association. Standard for fire-retardant-treated wood and fire-retardant coatings for building materials; NFPA 703 [S]. Quincy: National Fire Protection Association, 2018.
- [22] 吴伟, 周晓冬, 杨立中, 等. 电火花能量对木材引燃特性影响的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32(5): 891 – 894.
(WU Wei, ZHOU Xiaodong, YANG Lizhong, et al. An experimental study of the effect of spark energy on piloted ignition of wood [J]. Journal of engineering thermophysics, 2011, 32(5): 891 – 894.)
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 唐玉兰)