

基于Pyrosim的高海拔地区木结构建筑火灾蔓延规律

孙 锐

西南林业大学 土木工程学院 云南昆明 650224

【摘 要】为探究高海拔环境下木结构建筑的火灾蔓延规律，本研究以云南香格里拉独克宗古城为研究对象，基于Pyrosim火灾仿真软件，建立典型木结构古建筑三维模型，高原氧气比平原少（约少6%），空气更稀薄，重点观察木屋起火后的火势变化。结果表明：氧气不足导致火焰高度降低，但浓烟毒性更强（如一氧化碳浓度翻倍）；风吹动火焰倾斜，使相邻房屋被烤热的距离增加50%，更容易引燃隔壁建筑；火苗通过楼梯快速窜上二楼，二楼着火时间比平原快约半分钟；针对古城木质房屋密集的特点，提出房屋间距至少10米，并在木柱表面涂防火材料。

【关键词】高海拔地区；木结构建筑；Pyrosim；火灾蔓延规律

引言

古建筑群是人类历史与文化的宝贵遗产，它们以独特的建筑形式、精美的雕刻艺术和深厚的历史底蕴，向世界展示着各自民族的智慧和创造力，但许多古建筑因火灾而造成历史风貌被严重破坏。

在火灾燃烧过程中，环境因素影响火灾的变化较为显著，王雁楠^[1]通过改变房屋间距、风速、木材含水率和环境温度的因素来模拟古建筑火灾得出房屋间距和风速对火灾蔓延速度的影响大于环境温度和木材含水率；在低压低氧条件下木材燃烧的着火温度高，着火时间迟，着火时间的延迟可以为早期火灾探测提供有利条件；但由于接受的热辐射量大，着火温度高，容易引燃火源周围的其他可燃物，导致火灾的迅速蔓延^[2]；古建筑木材的燃点比新鲜木材的燃点低，且古建筑的木材燃烧速度更快，散发出更多的热量^[3]；袁春燕^[4]在发现风速作用下，火焰蔓延过程变化呈周期性变化，在一定范围内，风速越大，古建筑热释放速率达到峰值的时间越短；谷凡^[5]认为在地形、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；鄢银连^[6]模拟了纳西族民居建筑在无保护措施和有消防措施的不同防火间距对火灾蔓延过程的影响。

海拔的升高会导致大气压力和氧气浓度的降低，导致高海拔地区火灾的特点与平原地区火灾存在差异，火灾蔓延的发生具有不确定性。且高海拔地区的风力较大，干燥的气候条件容易使火势迅速发展，古建筑群布局紧凑，火势

很容易迅速蔓延至相邻建筑。因此，对影响古建筑群火灾蔓延进行定量分析，探究高海拔地区在不同风速下的安全防火间距，为高海拔地区古建筑防火提供参考依据。

PyroSim是一款基于FDS的图形用户界面（GUI）软件，通过提供直观的图形界面和丰富的建模工具，帮助用户快速构建火灾场景，设置边界条件，定义材料属性，并生成FDS可执行的输入文件。根据现场测绘数据，在Pyrosim中创建了火灾仿真模型，输入实地考察的参数来模拟自然火灾的发生。

笔者将建立以香格里拉独克宗古城拟建的中甸藏族民居木结构建筑为研究对象，利用火灾动力学仿真软件，模拟高海拔地区环境古建筑群的火灾蔓延特点与规律。

1 Pyrosim火灾模型建立

1.1 模型尺寸

该建筑模型是参考香格里拉独克宗古城一中栋木结构建筑，经实地考察，绘制模型如图5所示，该建筑+Z方向约6.5m，+X方向约为11.2m，+Y方向约为8.2m。该建筑共两层，首层大厅层高为2.3m，第二层阁楼层高为2m，只有一部楼梯位于房屋正中。在建筑内部的活荷载均用桌椅和床代替。

海拔3300 m对应大气压设为67 kPa（标准公式：

$$P = 101.325 \times \left(1 - 0.0065 \times \frac{H}{288.15}\right)^{5.255}$$

其中H=3300，氧浓度调整为*19.6%（平原地区为23%）

。空气密度与比热容参数根据海拔高度自动修正，直接影响燃烧速率与烟气扩散。设置年平均温度5.2℃，相对湿度55%，通过Pyrosim湿度模块影响木材引燃延迟时间。

在Pyrosim仿真软件特殊性的影响下，网格划分直接影响到结果的正确性和计算精度。根据模型场景将整个计算区域设定为**14m×10m×6m**，将网格分为8份，网格数总计为22680个。一层大厅和二层阁楼的火源均放置在正中隔间的桌子下，初始火源面积设定为**0.5m×0.5m**。根据建筑防烟排烟系统技术标准规定，火焰发展系数设定为**0.0469kW/s²**，火源类型采用**t²**型火势增长模型，模拟时间为2500s。该火源的设置基本满足了引燃建筑物的要求，且不影响建筑物燃烧的热释放率。根据实际火场环境的特点，计算区域的+Y面设置为进风口。

2 火灾蔓延规律

不同燃烧时刻的情况如图1所示，火灾初期，在300s左右，由于仅火源周围桌椅被引燃，起火范围较小。在700s左右，由于大厅开口密集，通风好，在风和浮力等作用下，火势逐渐蔓延。在1100s左右，此时上部烟气层平均温度已超过300℃，部分木构件开始热解。在2300s左右，由于二楼充斥大量可燃气体，与空气混合后，火羽流突破楼板进入二楼，使得二楼发生轰燃，上部约束表面（屋顶）与炙热烟气层对下部可燃物进行热辐射作用，使下部木制家具发生热解，持续产生可燃性气体，此时火势几乎失去控制。

图2显示了各房间测点的温度，从温度曲线来看，在火

源区域的温度在250s内变化了超过300℃，一层西南角及二层各房间均保持在室温，从250s到1900s期间，一层大厅除西南角位置因墙壁阻挡导致该区域风流通不畅，其余房间均为燃烧高温区。1900s后，二层各房间温度上升，火焰向二层蔓延。

一氧化碳即燃烧过程中的中间产物，通过肺部进入人体血液，与血红蛋白结合形成碳氧血红蛋白，使机体缺氧，对大脑的损伤最为严重。火灾发生后，由于中间房间只有一个门洞作为通风口，且该门开启方向正对窗户，外部风力作用下，燃烧消耗大量氧气，导致中间房间聚集了大量CO，形成严重的安全隐患。

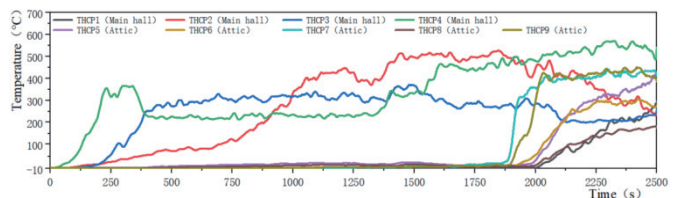


图2 各温度测点温度变化

3 结论与建议

本研究基于Pyrosim软件对香格里拉独宗古城高海拔古建群落的火灾蔓延规律进行数值模拟，重点揭示了不同风速对火灾行为的耦合影响，得到以下结论：

本研究基于香格里拉独宗古城（海拔3300m）典型二层木构建筑火灾数值模拟，揭示了高海拔低氧环境与固定风速（3m/s）耦合作用下的火灾蔓延规律，主要结论如下：

（1）燃烧特性改变：低氧环境导致木质构件热释放速

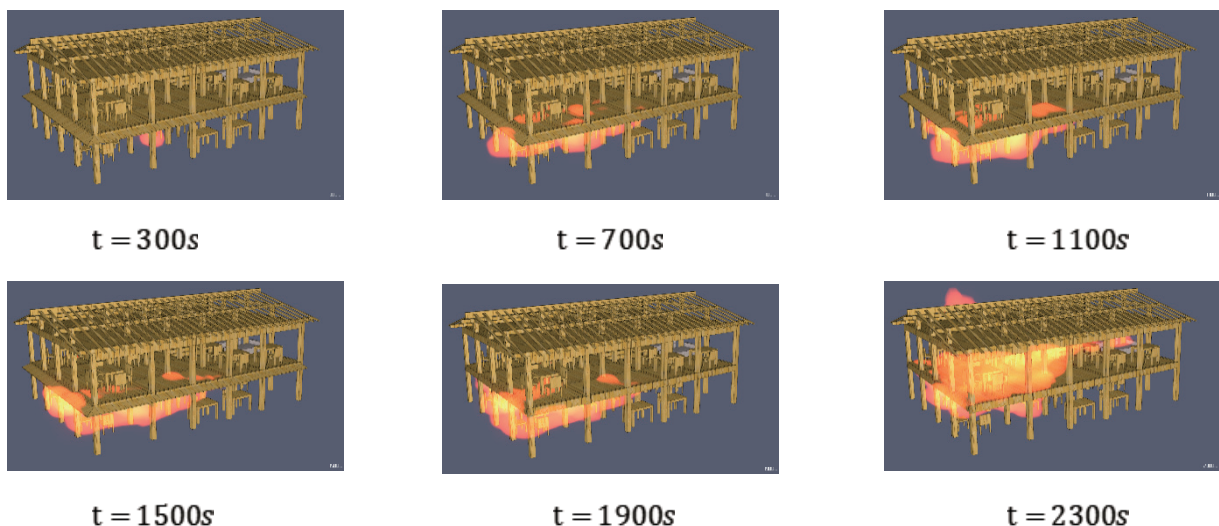


图1 各时刻燃烧图

率峰值降低18.7%，但燃烧持续时间延长26%，炭化深度增加40%；烟气毒性显著增强，CO浓度达平原环境的2.1倍，对人员疏散构成严重威胁。

（2）风驱蔓延机制：固定西北风作用下，使迎风侧木构件表面温度升高速度提升55%；飞火最远投射距离达12.8m（无风工况为5.2m），导致相邻建筑引燃风险倍增。

（3）垂直蔓延特征：楼梯井形成强烈烟囱效应，垂直方向温度梯度较平原环境增加38%，二层全面燃烧时间较一层滞后仅4分15秒；窗口热羽流受低压环境影响，热辐射范围扩大至水平方向8m外建筑（平原为5m）。

参考文献：

[1] 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 (06): 26-32.

[2] 孙晓乾, 李元洲, 霍然, 等. 西藏古建筑常用木材的着火特性试验[J]. 中国科学技术大学学报, 2006 (01): 77-80.

[3] Wang H Y, Tian Y, Zhang L. Experimental study of the characteristic parameters of the combustion of the wood of ancient buildings[J]. Journal of fire sciences, 2019, 37(2):117-136.

[4] 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 (05): 643-648.

[5] 谷凡, 张玉玉, 姜喻涵, 等. 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[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38 (05): 854-861.

[6] 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 (08): 1091-1093.

作者简介：

孙锐（2000.10—），男，汉族，云南昆明人，西南林业大学土木工程学院23级在读硕士研究生，硕士学位，专业：土木水利，研究方向：木结构火灾。