

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250430027

多功能按摩座椅燃烧特性试验与数值模拟研究*

刘畅¹, 张扬², 张健¹, 陈海东¹, 曾杰¹, 张月¹

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南昆明 650500; 2. 云南省消防救援总队, 云南昆明 650200)

摘要: 公共建筑中广泛使用的多功能按摩座椅存在较大的火灾风险, 探究其火灾发展规律对保障公共安全意义重大。采用全尺寸燃烧试验与FDS数值模拟相结合的方法, 系统分析了单体及组合式座椅的火灾发展特性。试验结果表明, 普通座椅热释放速率呈现典型“双峰”增长态势, 峰值分别为184.12 kW和1 054.76 kW; 采用阻燃材料的座椅热释放速率峰值降至8 kW, 降幅达99.24%。数值模拟进一步表明: 对于成组座椅, 在相同数量条件下, 双排布置火灾规模较单排布置增长46.58%; 当中心座椅引燃时, 热释放速率峰值达到极值, 引燃位置向边缘偏移可使单、双排布置的火灾危险性明显降低; 随座椅数量增加, 单、双排布置的热释放速率峰值均呈现先增后稳的非线性特征, 最终分别稳定在约2 019.20 kW和3 415.25 kW。基于临界热辐射阈值11.9 kW/m²的点源辐射模型表明, 单、双排布置的临界安全间距应分别大于2.01 m和2.62 m。研究建议公共建筑应优先选用经阻燃处理的产品, 并宜采用单排布局, 双排布置时单个座椅组规模不宜超过2×3。

关键词: 多功能按摩; 热释放速率; 全尺寸燃烧试验; 数值模拟; 安全间距

中图分类号: X932 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)06-1485-08

Experimental and Numerical Simulation Study on Combustion Characteristics of Multifunctional Massage Chairs

LIU Chang¹, ZHANG Yang², ZHANG Jian^{1*}, CHEN Haidong¹, ZENG Jie¹, ZHANG Yue¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Fire and Rescue Corps, Kunming 650200, China)

Abstract: Multifunctional massage chairs that are widely used in public buildings pose significant fire risks, making the study of their fire development patterns crucial for public safety. This study employed full-scale combustion tests and FDS numerical simulations to systematically analyze the fire development characteristics of individual and grouped chairs. The results showed that ordinary chairs exhibited a typical double-peak heat release rate (HRR) pattern, with peak values of 184.12 kW and 1 054.76 kW, respectively. The flame-retardant chairs demonstrated a peak HRR (PHRR) of 8 kW, representing a reduction of 99.24%. Numerical simulations further revealed that for grouped chairs with equal quantities, double-row arrangements increased fire magnitude by 46.58% compared to single-row arrangements. When ignition occurred at the central chair, the HRR reached maximum values. Shifting the ignition point toward the edges significantly reduced fire hazards under both arrangements.

* 收稿日期: 2025-04-30; 修回日期: 2025-06-09

基金项目: 云南省重点研发计划项目(No.202403AC100038)、昆明理工大学引进人才培养科研启动基金人文社科类项目(RP202409)资助

作者简介: 刘畅(1999—), 女, 硕士研究生。主要从事建筑火灾方面的研究。E-mail: 2628301484@qq.com

通信作者: 张健(1987—), 男, 讲师, 硕导, 博士。主要从事建筑火灾与城市韧性研究。E-mail: 18487089941@qq.com

As chair quantity increased, PHRR under both arrangements showed a nonlinear pattern of initial increase followed by stabilization, ultimately reaching approximately 2 019.20 kW and 3 415.25 kW, respectively. Based on a point source radiation model with a critical thermal radiation threshold of 11.9 kW/m², the critical safe distances under single-row and double-row arrangements should exceed 2.01 m and 2.62 m, respectively. This study recommends that flame-retardant products in public buildings should be prioritized, and single-row arrangements should be preferably adopted. For double-row arrangements, the size of a single chair group should not exceed 2×3 units.

Keywords: multifunctional massage chair; heat release rate; full-scale combustion experiment; numerical simulation; safety distance

0 引言

随着公共建筑服务品质不断提升,多功能按摩座椅休息区在候机厅、高铁站等高密度人流场所的配置规模持续扩大。这类商用多功能按摩座椅通常由金属框架作为主体支撑,内部填充软质聚氨酯泡沫材料,外层包覆装饰织物,以提供舒适的按摩体验。然而,这种材料组合也带来了较大的火灾安全隐患,尤其在座椅联排布局的工况下,火荷载密度及火灾蔓延风险进一步加剧,成为公共建筑消防安全设计中不容忽视的关键问题。

国内外学者对座椅火灾燃烧特性开展了一系列研究。在单体座椅燃烧特性方面,谷思念等^[1]通过全尺寸试验发现,单一多功能按摩座椅的热释放速率曲线呈现两个快速增长阶段,其峰值达到572 kW。在联排座椅研究方面,J. Zhu等^[2]研究了高铁车厢中的联排双椅,热释放速率峰值超过1 100 kW,且外场温度变化趋势与热释放速率一致。杨晓菡等^[3]针对影剧院座椅的燃烧试验证实,阻燃处理可大幅降低座椅的燃烧性能指标。在引燃位置影响方面,杨亮等^[4]通过对比试验指出,引燃位置对交通工具使用的联排座椅的热释放速率曲线走势影响显著。此外,路世昌等^[5]对体育场馆内5种典型座椅的全尺寸试验发现,部分软包座椅的热释放速率曲线具有“双峰”特征,表明其燃烧过程具有阶段性,存在较大危险。

尽管已有研究对不同类型座椅的燃烧特性进行了探讨,但针对多功能按摩座椅的系统性研究仍显不足,特别是不同材料的座椅燃烧特性对比和组合式座椅火灾特性方面,仍存在明显的研究空白。此外,现有研究较少关注座椅布置形式对火灾发展过程的影响。因此,开展多功能按摩座椅的实体燃烧试验,探究不同材料对其燃烧特性的影响,并进一步研究成组座椅的火灾发展规律,对科学评估多

功能按摩座椅的火灾危险性、制定有效防范措施具有重要理论意义和实践价值。

本研究采用燃烧试验与数值模拟相结合的方法,首先选取单体普通按摩座椅和单体阻燃按摩座椅作为研究对象,开展全尺寸燃烧试验,对比分析两者的燃烧现象和热释放特性。基于试验数据,运用火灾动力学模拟软件(FDS)建立单座椅精细化模型。在此基础上,系统研究不同摆放形式、引燃位置及座椅数量对成组座椅火灾规模的影响。最后,基于点源辐射模型对成组多功能按摩座椅进行理论分析,提出不同摆放形式下的临界安全间距建议,为公共建筑中多功能按摩座椅休息区的安全规划和火灾风险评估提供科学依据。

1 全尺寸多功能按摩座椅燃烧试验

1.1 试验样品

通过对机场、高铁站等典型应用场景调研,本研究选取了两款具有代表性的商用按摩座椅作为研究对象,分别进行单体座椅火灾实体燃烧试验。

所选座椅的主要可燃成分均为聚氨酯软垫泡沫,其中图1产品A为普通多功能按摩座椅,采用未经处理的聚氨酯软泡材料;图2产品B为阻燃多功能按摩座椅,采用经过阻燃处理的聚氨酯软泡材料。两款座椅的主要尺寸参数列于表1。



图1 普通多功能按摩座椅

Fig.1 Regular multifunctional massage chairs



图2 阻燃多功能按摩座椅

Fig.2 Flame-retardant multifunctional massage chairs

表1 试样座椅具体尺寸信息

Table 1 Detailed dimensional specifications of test sample chairs

产品编号	材料类型	长/mm	宽/mm	高/mm
A	普通材质	1 420	8 00	1 235
B	阻燃材质	1 430	8 00	1 250

1.2 试验方法

多功能按摩座椅的燃烧特性试验在符合 ISO 9705 标准的火灾试验室内开展。试验环境温度控制在 20 ± 1 °C, 相对湿度为 $50 \pm 5\%$, 试验前对所有测量仪器进行校准。试验采用大型锥形量热仪作为主要测试装置, 如图 3 所示。集烟罩底部开口为正方形, 尺寸为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 有效高度为 2 m。集烟罩的一侧与试验室墙体相连, 其余三侧均设置高度为 1 m 的竖直挡板, 形成半封闭的烟气收集空间, 以确保燃烧产物的有效收集并防止环境气流对试验的干扰。

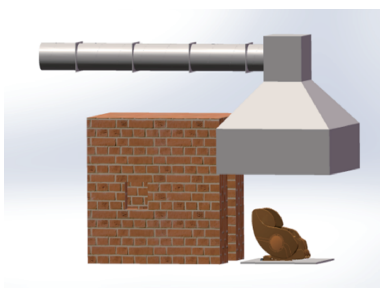


图3 全尺寸燃烧性能试验装置示意

Fig.3 Schematic diagram of full-scale combustion performance test setup

试验前, 将单体座椅置于锥形烟气收集器的正下方。根据 GB/T 27904—2011《火焰引燃家具和组件的燃烧性能试验方法》^[6], 采用功率为 20 kW 的丙烷点火器作为引燃源, 点火器位置统一设置在距离垂直软垫 50 mm、水平软垫上方 25 mm 处, 如图 4

所示。试验前 120 s 为预处理阶段, 主要用于仪器自检和基线数据采集, 不进行引火操作; 120 s 启动点火器并持续作用 300 s; 420 s 时, 关闭点火器, 座椅进入自由燃烧直至结束。



图4 标准点火源定位示意

Fig.4 Positioning of standard ignition source

1.3 试验结果与分析

1.3.1 燃烧现象

产品 A 的燃烧过程可以分为四个典型阶段: 初始燃烧阶段 (0~275 s): 火焰从椅面织物起始处逐渐向椅背蔓延, 伴随着火焰高度稳步上升; 快速发展阶段 (275~661 s): 椅背框架发生坍塌, 导致火焰高度短暂降低, 随后火势向座椅两侧及下部快速扩散; 全盛燃烧阶段 (661~855 s): 支撑框架完全坍塌, 座椅整体结构失效, 致使大量材料同时参与燃烧, 形成巨大的火团, 此时火焰高度和燃烧强度达到最大值; 衰减阶段 (855 s): 燃烧强度逐渐减弱, 直至有焰燃烧结束。整个燃烧过程伴随大量熔融滴落物和浓黑烟气的产生。

相比之下, 产品 B 表现出良好的阻燃效果, 仅在与引火源直接接触的座椅面出现局部烧焦现象, 未观察到明显的火焰蔓延行为。

1.3.2 热释放速率

图 5 展示了两款座椅全尺寸燃烧试验下的 HRR (Heat Release Rate, HRR) 随时间变化曲线。产品 A 的燃烧过程呈现典型的“双峰”特征: 第一个峰值出现在 275 s, 热释放速率为 184.12 kW, 主要由座椅表面材料的快速燃烧引起; 随着座椅结构的持续破坏, 特别是支撑框架完全坍塌后, 大量座椅材料参与燃烧反应, 导致热释放速率急剧攀升, 于 661 s 达到第二个峰值 1 054.76 kW。这种“双峰”现象充分反映了座椅结构完整性对其燃烧行为的显

著影响。其中第二个峰值虽持续时间较短,但瞬时产生的热释放强度已达到普通单人沙发^[7]的3.2倍,具有较高危险性。

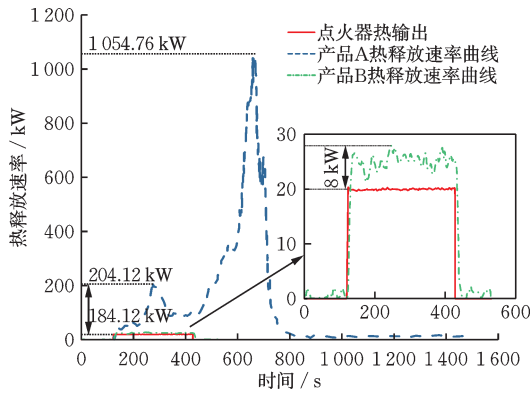


图5 多功能按摩座椅燃烧热释放速率曲线

Fig.5 Heat release rate curves of combustion of multifunctional massage chairs

产品B因采用阻燃材料,其最大热释放速率仅为8 kW,相较产品A降低了99.24%。这一差异表明,合理的阻燃处理能有效抑制座椅的火灾发展进程。

基于试验结果分析,建议公共场所应优先选用经过阻燃处理的多功能按摩座椅,或采取适当的物理隔离措施以降低火灾蔓延风险。

2 单体座椅火灾数值模拟研究

2.1 模型建立与参数设置

基于燃烧试验结果,产品A的热释放速率峰值远超GB 8624-2012^[8]软质家具B2级 ≤ 300 kW的材料标准,选取其作为数值模拟的研究对象。根据座椅实际尺寸(长1420 mm,宽800 mm,高1235 mm)建立三维精细化模型,如图6所示。



图6 单个多功能按摩座椅示意

Fig.6 Schematic diagram of single multifunctional massage chair

结合FDS软件材料库参数和燃烧试验结果,将座椅的主要可燃成分设置为聚氨酯软垫泡沫,其物理性能参数见表2。为保证模拟结果的代表性和稳定性,数值模拟中聚氨酯软垫的热解温度取参考范围中值270℃。

表2 聚氨酯软垫泡沫的物理性能参数

Table 2 Physical properties of polyurethane foam cushions

材料	导热率/ (W·(m·K) ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ (J·(kg·K) ⁻¹)	参考热解温 度范围/℃
聚氨酯 软泡	0.05	28.40	1.72	200~340

在座椅表面设置高热粒子进行引燃,以模拟外部点火源。模拟环境设置上、下表面封闭,其余区域开放,不考虑高大空间自然排烟窗的影响。初始环境温度为20℃,模拟时长为1500s。火源热释放速率的预估值取自产品A实体燃烧试验的峰值1054.76 kW。

2.2 网格划分与精度校准

网格划分是影响数值模拟精度和计算效率的关键因素。基于多功能按摩座椅常见应用场景调研,本研究构建的计算域尺寸为长9.0 m(X方向),宽6.0 m(Y方向),高6.0 m(Z方向),采用0.1 m×0.1 m×0.1 m的均匀立方体网格进行划分。为确保模拟结果的可靠性,采用以下公式^[9]进行网格特征值计算

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

$$\delta_x = \sqrt[3]{x \cdot y \cdot z} \quad (2)$$

式中, D^* 为网格特征值; ρ_∞ 为空气密度(kg/m³),取1.205 kg/m³; c_p 为空气比热容(J/K),取1.005 kJ/(kg·K); T_∞ 为环境温度,单位为K; g 为重力加速度,取9.81 m/s²; Q 为火源热释放速率,取1054.76 kW; δ_x 为计算网格尺寸, x, y, z 分别为单位网格X、Y、Z方向上的尺寸,均为0.1 m。

模拟过程中,座椅设置在计算域Z=0 m平面的几何中心,即座椅中心坐标为(4.5 m, 3.0 m, 0 m)。确保座椅到各边界距离的分布合理,以降低边界条件对火灾燃烧行为的影响,同时保证火羽流和烟气的充分发展。

2.3 单座椅模拟结果分析

为验证数值模拟模型的准确性,将FDS模拟获

得的热释放速率曲线与产品 A 实体燃烧试验结果进行对比分析,如图 7 所示。模拟结果与试验数据均呈现出明显的“双峰”增长特征:FDS 模拟结果显示,热释放速率在 278.02 s 时达到第一个峰值 199.75 kW,随后在 667.02 s 时攀升至第二个峰值 1 050.69 kW。与试验数据相比,该模型在曲线形态、特征时间点和特征值方面,均表现出较好的还原能力。关键特征值热释放速率峰值的相对误差仅为 0.38%,模型精度已满足后续成组座椅多场景模拟需求。

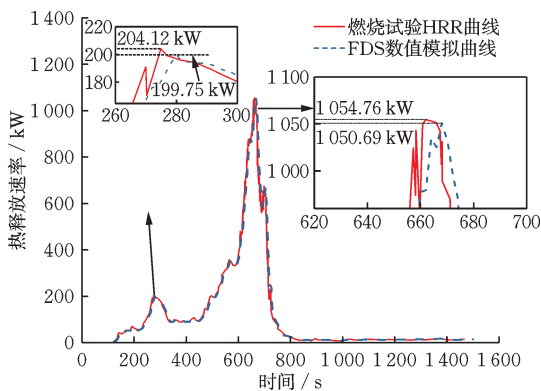


图7 数值模拟与实体燃烧试验 HRR 曲线对比

Fig.7 Comparison of HRR curves between numerical simulation and physical combustion test

根据 K. McGrattan 等^[10]的研究,当 D^*/δ_x 的比值在 4~16 范围内时,可获得较为准确的数值模拟结果。根据式(1)和式(2),本模型 $D^* = 0.98 \text{ m}$, $D^*/\delta_x = 9.8$,满足网格划分精度要求。

3 成组座椅火灾规模影响分析

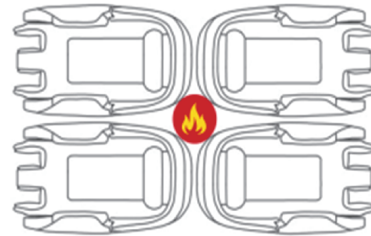
3.1 布置形式对成组座椅火灾规模的影响

本研究选取商用场景中普遍采用的单排横向和双排背靠背两类布局,通过数值模拟对比其火灾规模差异。共建立 1×4 与 2×2 两类座椅矩阵模型,均由 4 把普通多功能按摩座椅组成,具体布置形式和引燃位置如图 8 所示。

图 9 展示了相同座椅数量下,不同布置形式引起的热释放速率变化曲线的显著差异。单排横向布置时,热释放速率曲线呈现四个递进峰值,反映了火焰自几何中心位置向两侧扩散,座椅依次参与燃烧的阶段性特征。这种渐进式的火灾发展过程,使得同一时间,参与燃烧的可燃物数量有限,一定程度上延长了火灾持续时间,其最大热释放速率为 2 018.59 kW。



(a) 单排横向布置及引燃位置



(b) 双排背靠背布置及引燃位置

图 8 单、双排布置形式及引燃位置示意

Fig.8 Schematic diagram of single-row and double-row arrangements and ignition positions

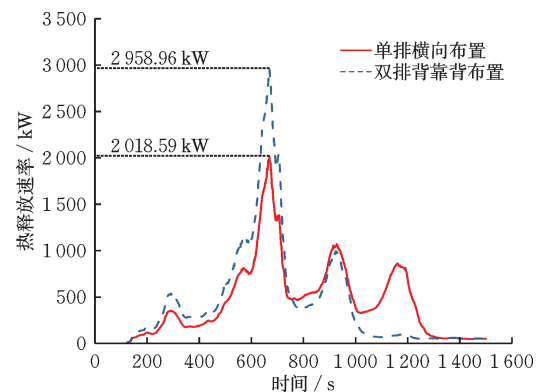


图 9 不同布置情况下成组座椅热释放速率曲线

Fig.9 HRR curves of grouped chairs under different arrangements

相比之下,双排背靠背布置的热释放速率曲线仅表现出三个相对集中的燃烧阶段,体现了座椅组集中燃烧的特征。紧凑的布局使得火焰辐射几乎同时作用于四把座椅,能够快速在座椅间蔓延,其最大热释放速率达 2 958.96 kW,较单排提升 46.58%,火灾风险倍增。

3.2 引燃位置对成组座椅火灾规模的影响

已有研究^[4]表明,改变引燃位置会影响座椅组整体燃烧过程中热释放速率曲线的变化特征。由于座椅椅面和扶手区域可燃物密度较高,且垂直方向更利于火焰向上传播,本研究针对单、双排布置形式,在对应位置共设置了多组引燃工况,以评估火灾风险极值场景。

单排布置形式,选取了中心处座椅椅面、相邻座椅扶手处及边缘座椅椅面三个典型引燃位置,具

体如图 10 所示。数值模拟结果如图 11 所示,虽然三种工况的热释放速率曲线均呈现四个燃烧阶段,但曲线特征存在明显差异。当引燃位置位于中心处时,火焰的双向蔓延特性使相邻座椅几乎同步参与热解反应,热释放速率峰值达 2 012.46 kW。初期的剧烈燃烧导致可燃物快速消耗,不仅缩短了整体燃烧时程,也使火灾的危险性达到最大。相比之下,当引燃位置位于边缘座椅椅面时,由于火焰需沿单一方向逐一蔓延至其他座椅,蔓延路径延长,热释放速率峰值降至 1 420.57 kW,较中心引燃降低了约 29.41%。

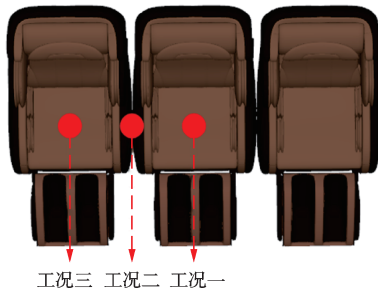


图 10 单排布置情况下引燃位置工况示意

Fig.10 Schematic diagram of ignition positions under single-row arrangement

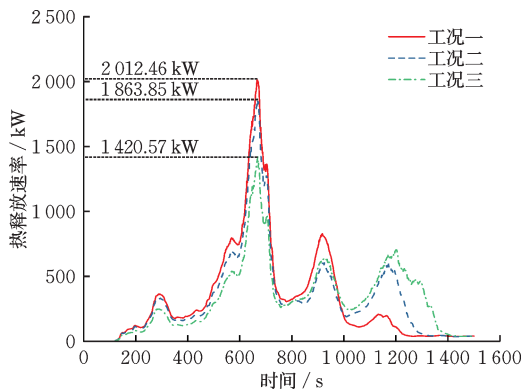


图 11 单排布置情况下不同引燃位置热释放速率曲线对比
Fig.11 Comparison of HRR curves at different ignition positions under single-row arrangement

对于双排布置,考虑到其本质是单排座椅的纵向延伸,因此在第一排座椅处,设置了相应的三种引燃工况,如图 12 所示。

热释放速率曲线对比如图 13 所示。随着引燃位置的偏移,座椅燃烧的同步性减弱,中心引燃工况的热释放速率峰值达 3 212.13 kW,而边缘椅面引燃时降至 2 291.04 kW,降幅达 28.68%。双排背靠背的紧凑布局强化了座椅间的热辐射和热对流,抵消了部分由引燃位置偏移的衰减效应,使得各工况的火灾规模始终高于单排布置。

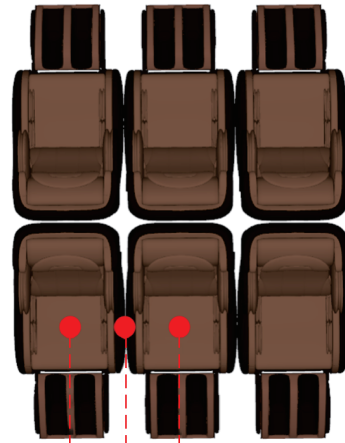


图 12 双排布置情况下引燃位置工况示意

Fig.12 Schematic diagram of ignition positions under double-row arrangement

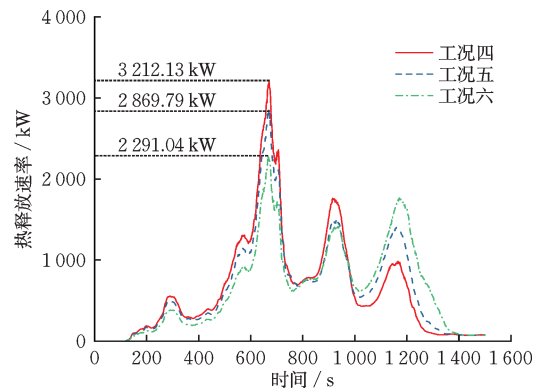


图 13 双排布置情况下不同引燃位置热释放速率曲线对比
Fig.13 Comparison of HRR curves at different ignition positions under double-row arrangement

两类布置形式的对比表明,引燃位置通过改变同时参与燃烧的可燃物数量,从而影响成组座椅的火灾规模大小。中心椅面引燃时,座椅燃烧同步性较高,其热释放速率峰值均达到极值。当引燃位置向边缘方向偏移时,两类布置的火灾风险均明显降低。

3.3 座椅数量对成组座椅火灾规模的影响

成组座椅火灾发展过程中,座椅数量与火灾规模之间存在复杂的非线性关系。具体而言,燃烧过程中释放的热量通过热辐射和热对流作用于相邻未燃座椅的表面,将会加速可燃物的预热和热解过程。这种热反馈机制使得相邻座椅之间的火灾发展过程更复杂。

为系统研究座椅数量对火灾规模的影响规律,本研究针对单、双排布置,分别设置了多种不同座

椅数量的工况,引燃位置均设定在前述研究确定的最危险位置。

图14为单排布置下不同座椅数量的热释放速率变化曲线。随着座椅数量增加,整体燃烧时间逐渐延长,热释放速率峰值呈现先增后稳的特征,曲线的特征峰值数量随之增多。随着参与燃烧的座椅数量增加,燃烧产物稀释了局部空间的氧气浓度,燃烧强度开始受限,标志着火灾规模进入稳定状态,使得火灾规模不再显著增长,最终稳定在2 019.20 kW附近。

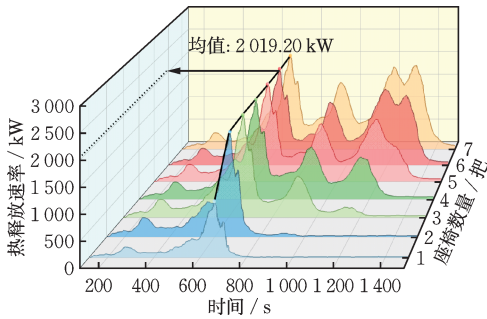


图14 单排布置情况下不同座椅数量热释放速率曲线对比
Fig.14 Comparison of HRR curves for different numbers of chairs under single-row arrangement

图15为双排布置下的热释放速率变化曲线,同样呈现出规律性变化。当座椅组规模增加到2×4时,热释放速率峰值明显增加,并表现出收敛性,最终稳定在3 415.25 kW附近。

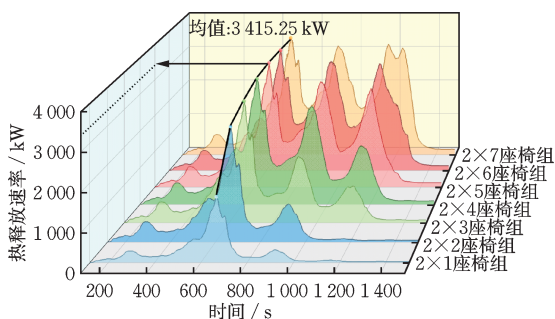


图15 双排布置情况下不同座椅数量热释放速率曲线对比
Fig.15 Comparison of HRR curves for different numbers of chairs under double-row arrangement

4 成组多功能按摩座椅安全间距理论计算

在大空间建筑火灾防控中,针对火灾危险性较高的家具等可燃物,通常采用“燃料岛”理论控制可燃物间距,以形成独立燃烧单元,达到有效抑制火

焰蔓延的效果。根据NFPA 92B^[11]标准,可将“燃料岛”简化为点源辐射模型进行理论分析。其安全距离计算公式为:

$$R = \left(\frac{\xi Q}{4\pi q_{cr}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中, R 为“燃料岛”中心点之间的安全距离,m; ξ 为辐射系数,通常取0.3; Q 为“燃料岛”的热释放速率,kW; q_{cr} 为临界引燃辐射通量,kW/m²,多功能按摩座椅的主要可燃物为聚氨酯软垫泡沫,当存在外部点火源时,其临界辐射通量为11.9 kW/m²^[12]。

根据3.3节获得的不同布置形式下成组座椅的热释放速率峰值上限,采用式(3)进行成组座椅布置安全距离理论计算。结果表明:单排横向布置时,相邻座椅组之间的临界安全间距应大于2.01 m;双排背靠背布置时,座椅组之间的临界安全间距应大于2.62 m。

5 结 论

(1) 多功能按摩座椅的燃烧过程呈现“双峰”特征,热释放速率峰值为1 054.76 kW,这与座椅材质和结构完整性有关;采用阻燃材料的座椅热释放速率峰值降低至8 kW,减幅达99.24%。建议公共建筑中应优先选用经过阻燃处理的产品。

(2) 双排座椅布置的火灾危险性明显高于单排布置。座椅数量(4把)相同时,双排布置因紧凑布局,进一步强化了座椅间的热辐射和热对流,使热释放速率峰值较单排布置增大约46.58%;中心引燃时,相邻座椅燃烧同步性较高,两类布置方式火灾规模均达到最大值。当引燃位置向边缘方向偏移时,单、双排的热释放速率峰值分别下降29.41%和28.68%;随座椅数量的增加,热释放速率峰值呈现先增后稳的非线性特征,最终单、双排布置分别稳定在约2 019.20 kW和3 415.25 kW。建议商业场所优先采用单排布局,双排布置时单个座椅组规模不宜超过2×3。

(3) 基于11.9 kW/m²临界热辐射阈值建立的点源辐射模型计算,单、双排布置的座椅组临界安全间距应分别大于2.01 m和2.62 m。

参考文献:

[1] 谷思念,卜雪民,杨志军.单一和联排多功能按摩座椅燃烧特性试验研究[J].消防科学与技术,2023,42(9):

- 1180-1186.
- Gu S N, Bu X M, Yang Z J. Experimental study on combustion characteristics of single and row multifunctional massage seats[J]. Fire Science and Technology, 2023,42(9):1180-1186.(in Chinese)
- [2] Zhu J, Li X J, Mie C F. Combustion performance of flame-ignited high-speed train seats via full-scale tests [J]. Case Studies in Fire Safety, 2015,4:39-48.
- [3] 杨晓菡,郭海东,尹朝露,等.不同影剧院座椅连排燃烧特性试验研究[J].消防科学与技术,2021,40(2):160-163.
- Yang X H, Guo H D, Yin C L, et al. Experimental study on combustion behavior of cinema seats row [J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(2): 160-163. (in Chinese)
- [4] 杨亮,赵婧,朱毅岚.常见交通工具用座椅燃烧性能试验研究[J].消防科学与技术,2016,35(11):1533-1536.
- Yang L, Zhao J, Zhu Y L. Experimental study on fire performance of common vehicle seat. [J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(11): 1533-1536. (in Chinese)
- [5] 路世昌,倪照鹏,阚强,等.深圳世界大学生夏季运动会体育馆观众座椅火灾试验研究[J].火灾科学,2012,21(4):189-196.
- Lu S C, Ni Z P, Kan Q, et al. Fire tests on chairs used in the stadium of the 26th Summer Universiade[J]. Fire Safety Science, 2012, 21(4): 189-196. (in Chinese)
- [6] 火焰引燃家具和组件的燃烧性能试验方法:GB/T 27904—2011[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [7] 张和平,徐亮,杨昀,等.室内沙发燃烧的全尺寸实验和数值模拟[J].燃烧科学与技术,2005,(3):208-213.
- Zhang H P, Xu L, Yang Y, et al. Full-scale experimental and numerical study on combustion behavior of upholstered sofa in enclosure[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, (3): 208-213. (in Chinese)
- [8] 建筑材料及制品燃烧性能分级:GB 8624—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [9] 钱舒畅,陆宇,樊莉,等.基于PyroSim的村寨木结构建筑室内消防改造的探讨[C]//第一届建筑防火大会.昆明:中国建筑学会;中国工程建设标准化协会;中国消防协会;中国建筑科学研究院,2022:71-76.
- Qian S C, Lu Y, Fan L, et al. Discussion on indoor fire protection retrofit of village wooden structures based on pyroSim [C]//1st Architectural Fire Protection Conference. Kunming; China Architecture Society; China Association for Engineering Construction Standardization; China Fire Association; China Academy of Building Research, 2022: 71-76. (in Chinese)
- [10] McGrattan K, McDermott R, Weinschenk C. and Forney G. (2013), Fire Dynamics Simulator Users Guide, Sixth Edition, Special Publication (NIST SP), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, [online], <https://doi.org/10.6028/NIST.sp.1019>
- [11] NFPA92B, Guide for Smoke Management Systems in Mall Atria and Large Areas National Fire Protection Association[S]. USA:National Fire Protection, 2000.
- [12] 康文东.火灾条件下聚氨酯软泡的收缩及燃烧行为研究[D].青岛:青岛科技大学,2018.
- Kang W D. Shrinkage and combustion behaviors of flexible polyurethane foam [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)