

彩钢夹芯板房防火间距的模拟与试验验证

王厚华¹, 李东书¹, 马锐²

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2. 四川省消防总队, 四川 成都 610036)

摘要: 依据既有试验数据, 开展了聚苯乙烯彩钢夹芯板房防火间距的计算机模拟, 并对模拟结果与试验结果进行比较, 得到最大热辐射强度的平均相对误差为 8.77%, 最高温度的平均相对误差为 7.71%, 证明了模拟方法的正确性. 在此基础上模拟分析了不同风速对板房火灾发展的影响, 通过模拟结果回归整理获得了不同风速下板房组团防火间距的数学表达式, 这些公式的相关性较好, 可推广使用并作为板房防火间距设计计算的参考.

关键词: 彩钢夹芯板房; 防火间距; 数值模拟; 试验验证
中图分类号: TU998.12 **文献标志码:** A

Simulation and Experimental Verification of Fire Safety Distance Between Color Steel Sandwich Panel Houses

WANG Houhua¹, LI Dongshu¹, MA Rui²

(1. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Sichuan General Fire Brigade, Chengdu 610036, China)

Abstract: A computer simulation was carried out to study the fire safety distance between color steel polystyrene sandwich panel houses based on the existing experimental data. The comparison between the simulation and experimental results shows that, for the worst case, the average relative error of the maximum heat radiation intensity is 8.77%, and the maximum temperature is 7.71%, which verifies the simulation method. A subsequent simulation study focused on the effect of different wind speeds to the development of panel house fire based on the former mode, the fire safety distance formulas were obtained by the regression analysis. With good correlations, the formulas can be promoted and they can be further used as a reference for the design and the calculation of the fire safety distance between sandwich panel houses.

Key words: color steel sandwich panel house; fire safety distance; numerical simulation; experimental verification

当重大自然灾害发生后, 中短期内临时安置灾民常常采用施工方便快捷的组合式板房. 板房进行修建时, 板房的排与排之间留有一定的间距, 供通行和防火之用. 在地形条件复杂的山区和丘陵地区, 寻找一块地势平坦的土地修建板房组团安置灾民往往比较困难, 通常希望采用较小的板房组团间距, 达到安置更多受灾群众及节省救灾资金的目的. 但间距过小, 发生火灾时将会形成“火烧连营”的场面, 其严重后果甚至可能超越自然灾害本身造成的损失.

板房失火后, 火势的扩散除了和板房材料的防火性能及板房间距有关, 还与火灾发生时的环境温度和湿度、风速及风向有关. 由于问题的复杂性, 至今我国尚未制定出相应的防火设计规范. 板房组团的设计和修建只能参照现有相关规范或者按照经验进行, 明显缺乏科学性、合理性和可靠性.

汶川地震发生后, 由于临时安置的灾民数量较多, 过渡安置房的火灾隐患非常大, 四川省消防总队迅速组织相关专家研究了灾区的地理、地质、气候、文化传统、生活习俗等情况, 评估了安置点的火灾风险、灾区的技术经济水准及采取相应措施的可行性, 预测了可能的风险后果, 并发布了一系列安全可靠、操作性强的防火技术措施, 规范了安置点的消防安全工作. 同时, 在参考了大量国内外相关资料的基础上, 制定并出台了《四川省地震灾区过渡安置房建设消防技术措施》, 其中, 对于板房安全间距的规定为: 组团内板房行间距不应小于 4 m, 组团之间防火间距不应小于 6 m. 这一规定与文献[1]的有关规定相比, 防火间距减小了 1/3. 公安部批准《汶川地震灾区过渡安置点消防安全研究》作为应用创新计划项目立项之后, 四川省消防总队开展了板房组团防火间距的实尺寸实体火灾试验研究, 获得了静风状态下的试验数据, 该结果弥补了我国相关研究成果的不足, 为板房组团防火设计规范的制定提供了重要资

收稿日期: 2013-04-21

基金项目: 公安部应用创新计划项目(2009YYCXSCST081)

第一作者: 王厚华(1952—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为建筑防排烟、建筑节能、强化传热.

E-mail: whhxinxiang@yahoo.com.cn

料^[2].为使试验结果推广应用于无试验数据的场合,本文在既有试验数据的基础上,开展了板房组团安全防火间距的计算机模拟研究.

1 模型与火灾场景设计

1.1 模型

计算机模拟采用美国国家技术标准局建筑火灾实验室开发的基于场模拟的火灾专用软件 FDS(fire dynamics simulator) 5.5.3,该软件采用了先进的大涡模拟技术,其模拟结果的准确性已得到众多火灾试验的验证,在火灾安全工程领域应用非常广泛.

为节省计算机资源使模拟更方便地进行,建模时对板房模型进行适当简化,设为单排三间聚苯乙烯彩钢夹芯板房,模型尺寸为:单间宽 3.9 m,进深 5 m,高 3 m,门窗洞口面积约占纵墙面积的 30%,板房模型与试验原型基本一致,见图 1.模拟区域的长、宽、高分别为 22,12,6 m,由于网格划分直接影响模拟时的计算精度和计算速度^[3],为了满足这两方面的平衡要求,即在保证计算精度的情况下尽量提高计算的速度,模拟时采用较小的精细网格划分,单个网格大小为 0.25 m×0.25 m×0.20 m.又由于聚苯乙烯彩钢夹芯板房耐火性能较差,着火后火势发展非常迅猛,钢结构受火后迅速软化,板房一般在着火后的 3 min 内发生塌陷^[4-5],且当火灾进入充分发展阶段时,各项危险指标很快趋于稳定,因此,模拟时间设定为 250 s.

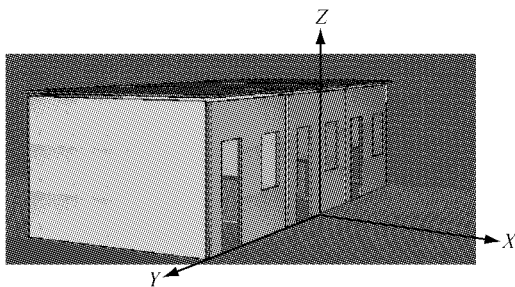


图1 模拟用板房模型

Fig.1 Sandwich panel houses mode

聚苯乙烯彩钢夹芯板的燃烧热约为 $39.4 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,燃点为 $346 \text{ }^\circ\text{C}$,自燃温度为 $490 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[6].板房内布置较为常见的床、被褥、衣柜、桌椅(木质家具用等量的黄松木代替),这些物品的组成材料及其对应的热物理参数均可在 FDS 软件自带的相应可燃物选项中找到^[7].

1.2 火灾场景设置

在以往进行火灾过程模拟计算时,由于 t^2 -稳定火源模型能够较好地满足工程分析的需要,且使用方便,因此,在火灾模拟中最为常见^[8],本次模拟亦采用这种火源模型.模拟时火源设置在中间板房的床上,初始功率为 1.2 MW,面积为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,即认为火灾由被褥引起,并引燃室内其他可燃物,最终引燃整个板房.同时,温度及热辐射强度的测点布置在前排中间房屋的正面,居中布置,距板房的距离为 3~9 m(沿图 1 中 X 轴正方向).温度测点的布置高度为 1.8 m,热辐射强度的测点布置高度为 1.6 m(沿图 1 中 Z 轴正方向).

环境温度为 $15.7 \text{ }^\circ\text{C}$,标准大气压,其他参数设置与试验时也基本相同.考虑到风速对火灾发展的影响,模拟时取四种不同的风速(v):0,2,3,4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,分别对应四种不同的火灾场景,称为场景 1~4.其中,场景 1 与试验条件一致,即处于静风状态.风向取最不利情况,即认为风从板房组团的后面吹来(沿 X 轴正方向),且没有障碍物或其他板房的阻挡,门、窗均处于开启状态.

2 静风状态下的模拟结果及试验验证

2.1 静风状态下的模拟结果

图 2 为场景 1 时,模拟获得的火灾热释放速率变化曲线.从图中可见,静风条件下火灾最大的热释放速率为 11 684 kW,出现在时间 $t=157.5 \text{ s}$ 时刻.观察火灾热释放速率变化曲线,能够清楚地看到火灾发展过程的四个阶段^[9]:0~75 s 为火灾初期; $>75 \sim 100 \text{ s}$ 进入火灾快速增长期,在该段时期内,板房内的可燃物不断被引燃并开始放热; $>100 \sim 160 \text{ s}$,火灾进入旺盛期,火灾的热释放速率及各项指标均达到最大值.从 FDS 软件显示的 smokeview 场景中可以看到,在此期间着火室两边的板房被部分引燃,大股火焰伴随浓烟从着火房间的门窗处喷出,发生轰然;之后,后墙及靠近火源处部分屋顶发生坍塌.

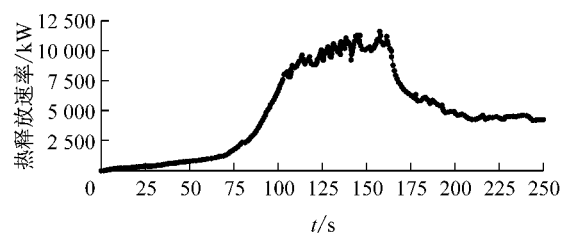


图2 热释放速率曲线(场景1)

Fig.2 The heat release rate curve(Fire scene 1)

塌,造成房间内的热压迅速减小,门窗喷出火焰的现象逐渐消失,火灾进入衰减期.

图 3 为距地高度 $Z=1.6\text{ m}$, $X=3\sim 9\text{ m}$ 不同坐标点处,模拟获得的热辐射强度 I 变化曲线. 表 1 列出了沿 X 轴正向不同坐标点处的热辐射强度的最大值 I_{\max} 及其到达最大值的时间 t . 从图 3 和表 1 中可以看出,随着 X 值的增加,最大热辐射强度是逐渐减小的. 根据 NFPA(美国消防规范)相关数据,通常认为引燃织物、纸张等材料的熱辐射强度临界值 I_{cr} 为 $10\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. 如取临界热辐射强度值为 $10\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$,从表 1 中可以得到如下结论:静风状态下,防火间距取 $X\geq 5\text{ m}$ 是安全的.

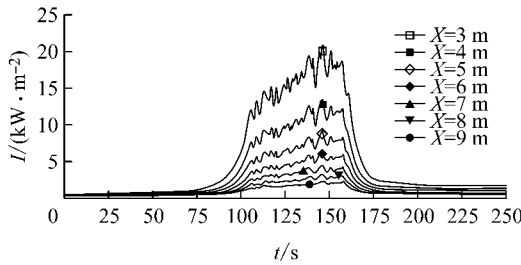


图 3 各坐标点热辐射强度变化曲线(场景 1, $Z=1.6\text{ m}$)
Fig. 3 The heat radiation intensity-time curves of different coordinate points(Fire scene 1, $Z=1.6\text{ m}$)

表 1 各坐标点最大热辐射强度值(场景 1, $Z=1.6\text{ m}$)
Tab.1 The maximum heat radiation intensity values of different coordinate points(Fire scene 1, $Z=1.6\text{ m}$)

X/m	$I_{\max}/(\text{kW}\cdot\text{m}^{-2})$	t/s
3	20.81	146.3
4	13.53	146.3
5	9.18	146.3
6	6.47	146.0
7	4.72	146.0
8	3.45	146.0
9	2.51	146.0

图 4 为模拟获得的 $Z=1.8\text{ m}$,不同 X 坐标点处的温度 T 变化曲线,表 2 列出了 $Z=1.8\text{ m}$ 不同坐标点处的温度最大值 T_{\max} 及其到达最大值的时间 t . 从表 2 中可以看出,火灾发生 147.5 s 后,高度 1.8 m、距离着火板房正面 3 m 处,最高温度仅为 $50.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. 随着 X 值增加,各坐标点最高温度值逐渐降低,当 $X=5\text{ m}$ 时,温度最大值 $T_{\max}=30.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此 $X\geq 5\text{ m}$ 的防火间距完全能够满足人员安全疏散的要求.

2.2 试验验证

试验在四川省都江堰市“青山锦苑”汶川地震灾

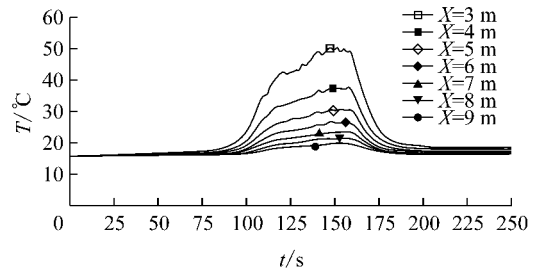


图 4 各坐标点温度变化曲线(场景 1, $Z=1.8\text{ m}$)
Fig. 4 The temperature-time curves of different coordinate points(Fire scene 1, $Z=1.8\text{ m}$)

表 2 各坐标点最高温度值(场景 1, $Z=1.8\text{ m}$)
Tab.2 The maximum temperature values of different coordinate points(Fire scene 1, $Z=1.8\text{ m}$)

X/m	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	t/s
3	50.5	147.5
4	38.0	147.5
5	30.9	148.0
6	26.6	158.3
7	23.7	158.3
8	21.5	159.0
9	19.9	159.0

区过渡安置点进行,单间板房面宽 3.87 m ,进深 4.98 m ,板房坡屋面屋脊高 3.14 m ,檐口高 2.74 m . 气象条件为:晴天、静风(风速 $v=0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、气温 $15.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 80% . 温度测量采用 WRK 型镍铬-镍硅铠装热电偶,适用范围为 $-40\sim 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$,允许偏差为 $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;辐射强度采用精度 $\pm 5\%$ 的 ZX7M-MR-5 型热辐射计测量,SWP-ASR 型 32 通道数据采集仪实时采集并储存实测数据. 试验板房原型、火灾场景气象条件、测点位置等与模拟时状况基本一致. 现场试验照片见图 5.



图 5 现场试验照片(场景 1)
Fig.5 The field experiment photo(Fire scene 1)

表 3 为 $Z=1.6\text{ m}$ 处各测点最大热辐射强度实测值与模拟值的比较结果. 由表 3 可见,对于距板房正面 $X=5,6,7,8\text{ m}$ 处的测点,测量值与模拟值之间的最大相对误差为 21.96% ,最小相对误差为 2.21% ,平均相对误差为 8.77% .

表 3 各测点最大热辐射强度试验值与模拟值的比较(场景 1, Z=1.6 m)

Tab.3 Comparison of the experimental values and the simulation values for the maximum heat radiation intensity at different measuring points (Fire scene 1, Z=1.6 m)

X/m	测量值 $I_{max}/$ (kW·m ⁻²)	模拟值 $I_{max}/$ (kW·m ⁻²)	相对误差/ %
5	8.90	9.18	3.15
6	6.33	6.47	2.21
7	3.87	4.72	21.96
8	3.74	3.45	7.75

注:相对误差=|模拟值-测量值|/测量值×100%.

表 4 为 Z=1.8 m,不同 X 坐标点处的最高温度试验值与模拟值的比较结果.由于辐射热量传递的方向是沿 X 轴正向,因此随着到着火板房距离的增加,温度值应呈逐渐降低的趋势,而表 4 中 X=4,5 m 处的试验测量值,与热量传递的规律显然不符,可判断为坏值.模拟值则符合距离越远、温度越低的热传递规律.剔除坏值后的可比数据中,最大相对误差为 23.17%,最小相对误差为 1.25%,平均相对误差为 7.71%.结合表 3 中最大热辐射强度的平均相对误差 8.77%判断,模拟结果可信.

表 4 各测点最高温度试验值与模拟值的比较(场景 1, Z=1.8 m)

Tab.4 Comparison of the experimental values and the simulation values for the maximum temperature at different measuring points (Fire scene 1, Z=1.8 m)

X/m	测量值 $T_{max}/^{\circ}C$	模拟值 $T_{max}/^{\circ}C$	相对误差/%
3	41	50.5	23.17
4	23	38.0	—
5	25	30.9	—
6	26	26.6	2.31
7	24	23.7	1.25
8	22	21.5	2.27
9	22	19.9	9.55

3 有风状态下的模拟结果

从火灾安全角度考虑,板房组团间距应考虑最不利的火灾场景,即应考虑板房安置点的最大风速和风向.但如此考虑的结果将使得板房间距过大,不利于安置点的选择,不但会增加占地、固化地坪混凝土用量及拆除费用,而且也增大了环境污染的风险.

按照各地常年平均风速和风向确定板房防火间距,且当多风季节风速可能超过其平均风速时提

前预警,使居民做好充分的防火准备应该是较为合理的决策.基于此,继续模拟分析了风速为 2,3,4 m·s⁻¹三种风速情况下的火灾发展状况,以模拟结果为参考提出不同风速下的板房火灾安全间距.为便于比较,模拟时除风速以外,其他模拟条件与静风时模拟条件一致.

由于要处理的数据及图表较多,为节省篇幅,本文仅给出风速为 2 m·s⁻¹情况下(场景 2)最大热释放速率时的 smokeview 图像.

对于火灾场景 2,当 t=161.0 s 时,火灾热释放速率达到最大值 12 739 kW,比静风状态时增加了约 9%.从图 6 中可以清晰地看到此时的火灾状况,火灾烟气几乎完全覆盖了着火板房屋顶.对于火灾场景 3,当 t=162.5 s 时,火灾最大热释放速率达到 13 074 kW,比静风状态增加了 12%.对于火灾场景 4,当 t=143.3 s 时,火灾最大热释放速率达到 13 098 kW,比火灾场景 3 稍微增大.表 5 列出了三种火灾场景下,模拟得到的 Z=1.6 m 处各 X 坐标点的最大热辐射强度值及其达到该值所需的时间.表 6 列出了三种火灾场景下,模拟得到的 Z=1.8 m 处各 X 坐标点的最高温度及其达到该值所需的时间.

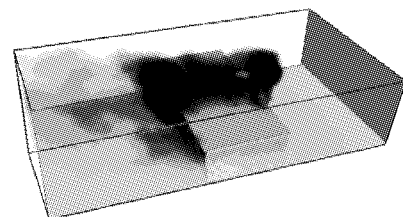


图 6 火灾 smokeview 图像(场景 2, t=161.0 s)

Fig.6 The simulation image of smokeview (Fire scene 2, t=161.0 s)

表 5 三种火灾场景各坐标点最大热辐射强度值(Z=1.6 m)
Tab.5 The maximum heat radiation intensity values of different coordinate points (three fire scenes, Z=1.6 m)

X/m	场景 2		场景 3		场景 4	
	$I_{max}/$ (kW·m ⁻²)	t/s	$I_{max}/$ (kW·m ⁻²)	t/s	$I_{max}/$ (kW·m ⁻²)	t/s
3	22.30	139.5	26.48	151.0	26.40	152.3
4	14.40	139.5	16.83	151.0	17.03	149.5
5	9.89	144.0	11.11	151.0	11.67	149.8
6	7.16	144.0	7.58	151.8	8.32	149.8
7	5.27	144.0	5.36	151.8	6.05	149.8
8	3.91	144.3	3.96	140.0	4.45	149.8
9	2.91	144.3	2.97	139.8	3.28	150.0

表 6 三种火灾场景各坐标点最高温度值($Z=1.8\text{ m}$)Tab. 6 The maximum temperature values of different coordinate points(three fire scenes, $Z=1.8\text{ m}$)

X/m	场景 2		场景 3		场景 4	
	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	t/s	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	t/s	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	t/s
3	52.6	145.0	51.5	153.0	55.5	153.5
4	37.5	145.0	37.8	151.8	40.0	155.0
5	29.5	145.0	31.8	151.3	31.9	157.3
6	25.6	144.8	27.5	155.8	27.7	141.3
7	23.0	147.0	24.7	155.8	26.3	138.3
8	21.3	148.5	22.8	156.3	23.9	139.0
9	20.1	145.8	21.2	146.3	21.9	145.3

由表 5 和 6 的模拟数据可以看出,随着风速的增大,除个别点以外,各坐标点最大热辐射强度和最高温度均增大,表现出明显的风助火势.因此,板房防火间距的确定应该考虑各地气象条件的差异,不可一概而论.

4 板房防火间距计算公式

根据各种火灾场景下的模拟结果,采用一元回归方法,获得了不同风速下最大热辐射强度与距板房正面距离 X 的函数关系式,如下所示:

$$v = 0\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$I_{\max} = 54.88\exp(-0.348X) \quad (1)$$

其中, $R^2 = 0.9961$.

$$v = 2\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$I_{\max} = 55.74\exp(-0.334X) \quad (2)$$

其中, $R^2 = 0.9946$.

$$v = 3\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$I_{\max} = 72.20\exp(-0.364X) \quad (3)$$

其中, $R^2 = 0.9932$.

$$v = 4\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$I_{\max} = 68.24\exp(-0.343X) \quad (4)$$

其中, $R^2 = 0.9956$.

式(1)~(4)的相关系数均大于 0.99,说明拟合的指数函数关系相关性很好.利用式(1)~(4),可以计算出不同风速条件下板房组团之间的最小安全防火间距.取临界热辐射强度 $I_{\text{cr}} = 10\text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$,并且在上述函数关系式中用 I_{cr} 代替最大热辐射强度 I_{\max} ,即可求得板房组团防火间距 X .例如,静风条件下,利用式(1)可以求得

$$X = -\frac{1}{0.348} \ln \frac{10}{54.88} = 4.89\text{ m}$$

即当 $X \geq 4.89\text{ m}$ 时,最大热辐射强度不会超过临界热辐射强度,因此这样的间距在静风状态下是安全

的,不会引燃该间距以外的板房.如果风速为 $4\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,应用式(4)可以计算得出

$$X = -\frac{1}{0.343} \ln \frac{10}{68.24} = 5.6\text{ m}$$

即当 $X \geq 5.6\text{ m}$ 时,最大热辐射强度仍然不会超过临界热辐射强度,因此这样的间距在 $v = 4\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时是安全的.

式(2)~(4)是在风向无障碍物阻挡且门窗处于开启状态的最不利情况下得出的,当着火板房处于板房组团的中心区域,考虑到相邻板房的阻挡或门窗关闭的影响时,风的助燃作用会进一步降低,因此模拟的计算结果有更好的安全保证性.

5 结论

(1) 静风状态下(场景 1)的模拟结果与试验结果吻合良好,说明模拟方法正确,模拟结果可信.因此,采用计算机模拟预测真实火灾状况科学、合理,并且是可以实现的.

(2) 风速不同对板房组团之间的防火间距具有明显的影响.在设计火灾场景之下,以临界热辐射强度 $I_{\text{cr}} = 10\text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 为判定条件,通过模拟结果回归得到的防火间距计算式可计算出不同风速条件下板房组团之间的安全防火间距.

本文所采用的性能化防火设计方法可适用于研究不同气象条件、不同材质建筑组团的防火设计.我国各地地理条件及环境因素的差异性较大,不同材料的板房耐火性能也不尽相同,且 FDS 软件有其本身的局限性,因此本文计算机模拟的结果仅适用于近似符合模拟条件的板房组团.关于环境温度对板房火灾发展的影响,板房材质耐火性能对临界热辐射强度取值的影响等重要问题,尚需进一步深入研究,其中试验研究具有非常重要的意义.

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部.地震灾区过渡安置房建设技术导则(试行)[S].北京:住房和城乡建设部,2008.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical guidelines of transitional houses construction in earthquake hit area (trial) [S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2008.
- [2] 四川省消防总队.板房火灾实验研究报告[R].成都:四川省消防总队,2010.
Sichuan General Fire Brigade. Experimental research report of panel house fire [R]. Chengdu: Sichuan General Fire Brigade,

- 2010.
- [3] 周庆. 网格划分对 FDS 火灾模拟结果的影响分析[J]. 安全, 2011(8):8.
ZHOU Qing. The impact analysis of meshing to the fire simulation results in FDS[J]. Safety Science and Technology, 2011(8):8.
- [4] 杨庆云, 颜东升. 金属面 EPS 夹芯板燃烧性能及防火对策研究[J]. 科技信息, 2010(23):549.
YANG Qingyun, YAN Dongsheng. Study on the combustion performance and fire prevention countermeasures of EPS sandwich board[J]. Science & Technology Information, 2010(23):549.
- [5] 宋晓勇. 彩钢夹芯板房和帐篷的防火间距研究[J]. 消防科学与技术, 2011, 30(11):1007.
SONG Xiaoyong. Study of fire safety distance between transitional houses and tents[J]. Fire Science and Technology, 2011, 30(11):1007.
- [6] 周全会, 刘仕杰. 聚苯乙烯泡沫夹芯板的火灾危险性评析[J]. 消防科学与技术, 2008, 27(9):644.
ZHOU Quanhui, LIU Shijie. Fire risk evaluation of EPS sandwich board[J]. Fire Science and Technology, 2008, 27(9):644.
- [7] The RJA Group Inc. FDS(Version 5) Pyrosim user manual[M]. Gaithersburg: The RJA Group Inc, 2011.
- [8] 钟委, 霍然, 史聪灵. 热释放速率设定方式的几点讨论[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(2):64.
ZHONG Wei, HUO Ran, SHI Congling. Some discussion on methodology to design heat release rate[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(2):64.
- [9] 范维澄, 周建军, 王清安, 等. 火灾学简明教程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995.
FAN Weicheng, ZHOU Jianjun, WANG Qing'an, et al. Concise tutorial of fire science[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1995.

~~~~~

(上接第 504 页)

- [7] Prokopski G. Fracture toughness of concretes at high temperature [J]. Journal of Material Science, 1995, 30(6): 1609.
- [8] Hisham A F, Sameer A H. Variation of the fracture toughness of concrete with temperature [J]. Construction Building Materials, 1997, 11(2): 105.
- [9] 陆洲导, 俞可权, 苏磊, 等. 高温后混凝土断裂性能研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 845.  
LU Zhoudao, YU Kequan, SU Lei, et al. Residual fracture behaviors of post-fire concrete [J]. Journal of Building Material, 2012, 15(6): 845.
- [10] 俞可权, 陆洲导. 高温后混凝土软化本构曲线的确定[J]. 建筑材料学报, 2012, 16(3): 845.  
YU Kequan, LU Zhoudao. Determination of softening traction-separation laws of post-fire concrete [J]. Journal of Building Material, 2013, 16(3): 462.
- [11] 俞可权, 陆洲导. 高温后混凝土断裂全过程的裂缝扩展阻力曲线[J]. 浙江大学学报:工学版, 2013, 16(4): 113.  
YU Kequan, LU Zhoudao. Residual crack extension resistance during the complete fracture process of post-fire concrete [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2013, 16(4): 113.
- [12] Petersson P E. Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials [R]. Lund: Division of Building Materials of Lund Institute of Technology, 1981.
- [13] Comité Euro-International du Béton. CEB-FIP model code 1990 [M]. Lausanne: Bulletin D'Information, 1993.
- [14] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1981.  
Aviation Institute of China. Stress intensity factor handbook [M]. Beijing: Science Press, 1981.
- [15] Jenq Y S, Shah S P. Two parameter fracture model for concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111(10): 1227.
- [16] Bueckner H F. A novel principle for the computation of stress intensity factors [J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1970, 50:529.
- [17] 张秀芳, 徐世焯. 权函数法计算的混凝土断裂韧度[J]. 工程力学, 2011, 28(4): 58.  
Zhang X F, Xu S L. Fracture toughness of concrete determined using weight function method [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(4): 58.
- [18] Xu S L, Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part II: analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beam [J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2):151.
- [19] Xu S L, Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part III: compact tension specimens and wedge splitting specimens [J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2): 179.
- [20] 俞可权. 高温后混凝土断裂性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.  
YU Kequan. Residual fracture properties of concrete subjected to elevated temperatures [D]. Shanghai: Tongji University, 2012.