

双层玻璃幕墙全尺寸火灾实验研究

倪照鹏¹, 路世昌¹, 智会强¹, 汪磊²

(1. 公安部天津消防研究所, 天津, 300381;

2. 中国矿业大学, 徐州, 221008)

摘要: 针对双层玻璃幕墙实际应用中的消防问题, 采用全尺寸火灾实验的方法对火焰和烟气在双层幕墙结构中的传播进行了分析研究。实验采用模拟客房床垫中央着火工况、模拟客房床垫角落着火工况和模拟客房整体失火工况 3 种工况, 得出了火焰传播过程和烟气在幕墙夹层内运动特征及双层玻璃幕墙结构临界破碎温度、破碎时间等耐火性能特性。

关键词: 双层玻璃幕墙; 火灾实验; 火焰传播; 烟气运动; 临界破碎温度

1 引言

近年来, 我国许多大中城市涌现出了各种大型或高层的现代化公共建筑, 如体育馆、展览馆、影剧院、酒店、机场、商业广场等。为了追求美观和较好的室内采光效果, 这些建筑的外墙多采用玻璃幕墙的形式。其中, 双层玻璃幕墙由于其玲珑剔透的美感、节能环保的特性以及高档的建筑品味, 正被越来越多的国内外建筑所采用^[1]。

双层玻璃幕墙是一项新颖的技术, 内外幕墙之间的夹层往往贯穿数个楼层, 其上、下两端和大气相通, 形成自下而上的自然通风。已建成的采用双层幕墙的建筑, 既有多层建筑, 也有高层建筑。双层幕墙有多种构造形式, 其中一种典型的构造形式, 由内幕墙玻璃、外幕墙玻璃及在两者之间的通风式空气夹层所组成, 夹层内还常设有维修走道, 见图 1 所示。还有一种更为新颖的双层幕墙形式, 是在采用玻璃幕墙作为立面的建筑外再加一个玻璃罩, 外罩玻璃和建筑立面幕墙之间形成双层幕墙, 夹层作为缓冲区^[2]。

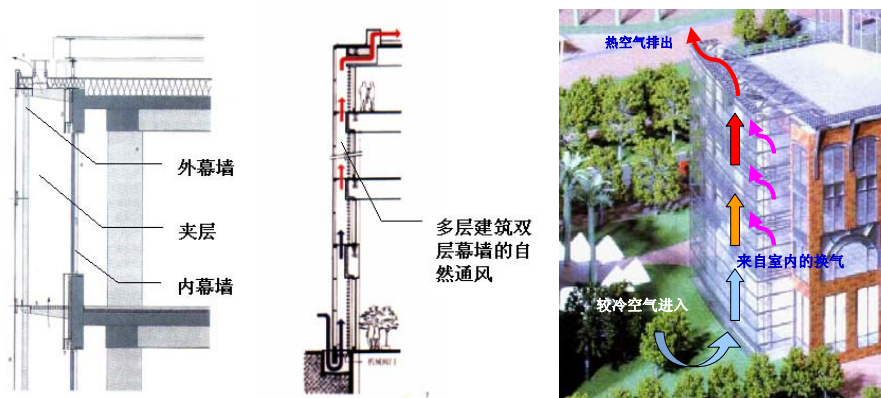


图 1 双层玻璃幕墙常见的构造形式

2 双层幕墙应用的消防问题

双层玻璃幕墙内外幕墙之间有较宽 (通常为 0.8m~2m) 的夹层^[3], 平时可利用烟囱效应实现自然通风, 符合当今环保、节能的生态建筑设计主题, 在火灾时也有可能成为烟和火向上层蔓延的通道, 加速火灾的竖向蔓延, 给消防安全带来不利影响。

由于其独特的结构形式, 在发生火灾时, 双层玻璃幕墙在以下几个方面增加了建筑的火灾危险性^[4], 所带来的火灾危险主要为:

1) 火势易于蔓延。发生火灾时, 如果幕墙玻璃和楼板之间的间隙防火封堵不严, 则有可能造成火焰和烟气的向上蔓延; 或者一旦内幕墙玻璃破裂, 由于双层幕墙之间的烟囱效应,

火和烟气通过内外幕墙之间的夹层向上蔓延，短时间造成上部房间着火。

2) 扑救难度大。建筑物内发生火灾后，因玻璃幕墙的整体密封性能较好，从建筑物外面无法准确判断起火部位和火势大小，增加了消防队员控、灭火难度与时间。在外幕墙玻璃破碎之前，外部施救人员使用登高消防车辆从室外直接灭火和营救建筑内被困人员有较大困难。

3) 高空坠落物易伤害人员。火灾情况下由于高温作用或玻璃与框架热胀系数不一致，可能导致玻璃破碎而脱落，高空坠落的玻璃等物体会对地面人员造成伤害。

3 工程应用实例

天津某文化广场是一座多功能综合性高层民用建筑，地上 19 层，地下 1 层，总建筑高度 87m（钢结构高度为 135m），总建筑面积为 $19.6 \times 10^4 \text{m}^2$ 。该建筑酒店部分的外墙，设计选用双层环保型玻璃幕墙，酒店客房内层选用断桥隔热明框幕墙，外层选用点支式幕墙，设置一定数量的百叶窗、开启窗，实现防火、通风、节能及环保要求，见图 2 所示。

酒店的客房主要布置在锥形金字塔的 7~14 层，客房的尺寸为 9.0m（长） \times 4.0m（宽） \times 3.3m（高），有一个通向客房外走廊的门，见图 3 所示。内幕墙采用 6mm+9A+6mm 双层中空钢化玻璃，每层玻璃厚度为 6mm，中空厚度为 9mm，固定采用断桥隔热式铝合金框，缝隙用防火胶封堵。外幕墙采用 12mm+1.52mmPVB+12mm 双层钢化夹胶玻璃，每层玻璃的厚度为 12mm，夹胶层的厚度为 1.52mm，固定采用双向支撑拉杆点支式铝合金框架体系，缝隙用透明玻璃胶封堵。内外幕墙之间的距离为 860mm（夹层厚度），上下层之间的窗槛墙为幕墙铝板，其内部及空隙处采用防火岩棉填充。

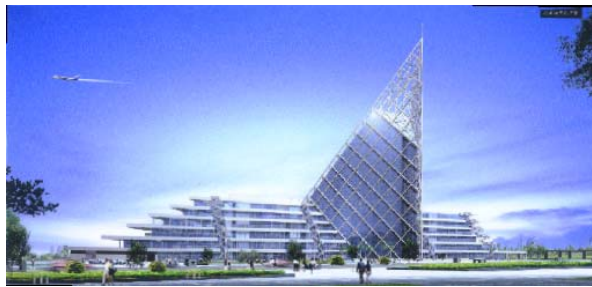


图 2 双层玻璃幕墙工程应用实例

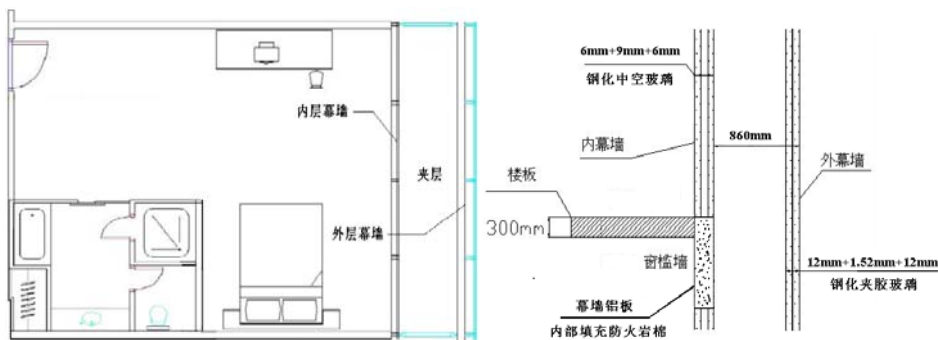


图 3 酒店客房双层幕墙构造示意图

由于双层呼吸式玻璃幕墙是一种新颖的幕墙构造形式，在国内外的应用实例很少。目前，在世界各国的防火规范中，尚没有针对双层幕墙建筑的专门规定。我国现行国家标准《建筑设计防火规范》（GB50016-2006）和《高层民用建筑设计防火规范》（GB50045-95）的规定基本相同，都要求采用玻璃幕墙的建筑在其上、下层之间设置高度不低于 0.8m 的窗槛墙，且玻璃幕墙与每层楼板、隔墙处的缝隙应采用防火材料进行封堵。中国香港地区的规范中也

只是要求上、下两层窗口之间应有高度不低于 0.9m 的窗槛墙。同样，在澳大利亚和新西兰的防火规范中也都有类似的规定，即在上、下层之间应设置不低于一定高度的窗槛墙，其中，新西兰防火规范规定可以用防火挑檐代替窗槛墙^[5]。

此类建筑的防火设计在各国规范中均没有专门规定，各国消防研究机构对双层幕墙火灾特性的研究资料也较少，未见关于双层幕墙火灾特性的实验研究文献或报道。因此，开展相关全尺寸火灾实验研究，了解双层幕墙在火灾中的特性，探讨解决双层幕墙相关防火问题的措施和方法，对推动这种环保、节能的结构形式在建筑中安全应用具有积极的意义。

4 全尺寸火灾实验研究

4.1 建立实体模型

为真实反映该建筑双层玻璃幕墙的火灾蔓延特性，确保实验模拟的准确性和可重复性，在建立实体实验模型时采用同工程设计和实际构造相同的双层玻璃幕墙，并按客房实际尺寸搭建了一座 2 层的钢结构楼房模拟酒店建筑中的上下两层客房。每层各有一间客房，每间客房的尺寸为 9.0m（长）×4.0m（宽）×3.3m（高），在两层客房正面两侧加装两面墙体，钢结构表面覆盖防火板，见图 4 所示。



图 4 实验幕墙模型正、侧面照片

在外侧幕墙安装了 12 块 2m×2m 的双层钢化夹胶玻璃，内侧幕墙安装了 12 块 0.9m×1.8m 的双层中空钢化玻璃，内外幕墙之间的夹层两侧采用防火板分隔。

4.2 温度测量

采用 K 型铠装镍铬—镍硅热电偶测量实验过程中的特征点温度。

实验时，内层玻璃幕墙布置了 12 支热电偶，其中迎火面（即内幕墙内侧）布置了 4 支，编号为 T11~T14，各自位于 4 块幕墙玻璃中心，距地面均为 1m；背火面（即内幕墙外侧）布置了 8 支，编号为 T1_上~T4_上和 T1_下~T4_下，各自位于 8 块幕墙玻璃中心，分别距地面均为 1m 和 4.3m，见图 5 所示。

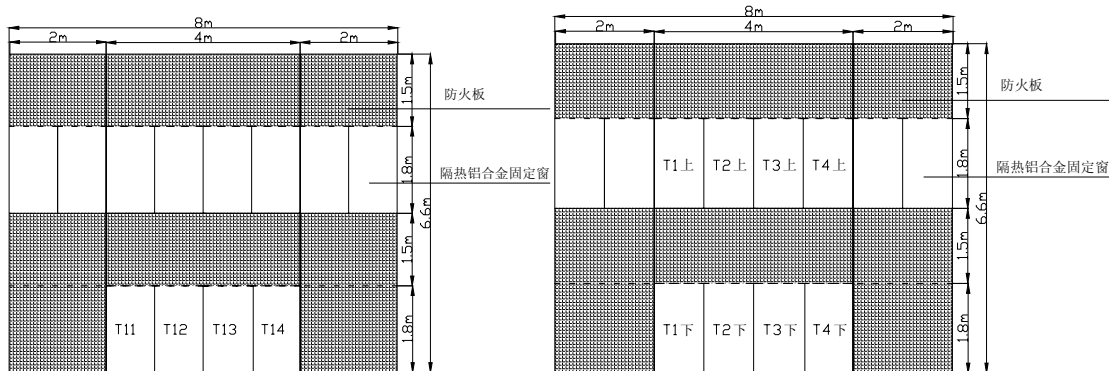


图 5 内层玻璃幕墙热电偶布置图

外层玻璃幕墙布置了 6 支热电偶，均位于外幕墙内侧，编号为 T5~T10，各自位于中间 6 块幕墙玻璃中心，距地面分别为 1m、3m 和 5m，见图 6 所示。

另外，在火源上方还设置了 2 支热电偶，编号为 T15 和 T16，距地面分别为 1m 和 3m。

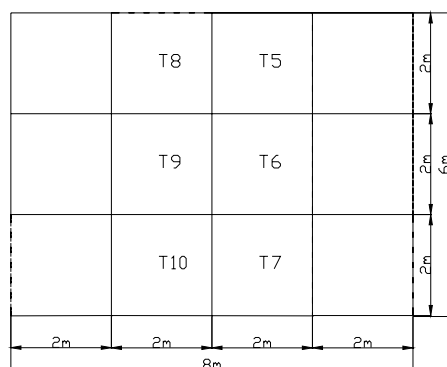


图 6 内层玻璃幕墙热电偶布置图

4.3 火源设置及最大热释放速率的确定

火源采用标准丙烷气体，在实验中通过调节阀控制流量使火灾功率逐渐增大，同时在丙烷燃烧器前方放置了一个小型油盘，加入少许柴油，以产生烟气，便于观测幕墙夹层间烟气的运动情况。其中油盘和丙烷燃烧器距房间两边侧墙 1.6m，距内幕墙分别为 0.6m 和 1m。

根据工程设计实际布置情况，靠近幕墙玻璃且房间内最易着火的部位为床，故前两次实验主要模拟床垫发生火灾时对幕墙玻璃的影响。根据美国标准技术研究院（NIST）关于家具火灾的实验数据，床垫中央着火和角落着火的热释放速率峰值分别为 0.7MW 和 1.0MW^[6]，前 2 次实验分别模拟这 2 种场景下的火灾。

对于客房全部着火，考虑到客房内布置了快速响应喷头，采用 DETACT-DET12 对快速响应喷头的热敏性能进行分析，模拟计算条件如下：1) 火灾为自由发展的 t^2 快速火灾；2) 顶棚距火源高度：2.5m；3) 快速喷头响应时间指数 $RTI=50m^{1/2}s^{1/2}$ ，喷头动作温度为 74℃，喷头间距 3.6m，喷头距火源最远距离为 4.1m；4) 环境温度 20℃。根据计算结果，喷头在 152.1s 时动作，此时火灾热释放速率为 1.1MW。为保守起见，第 3 次实验采用最大火灾热释放速率为 2MW。

受现有的罐装标准丙烷气发生装置所能达到的火源最大热释放速率（为 0.9MW）的限制，实验中将油盘换成木垛。木垛参照国家标准《推车式灭火器性能要求和试验方法》（GB8109-87）的规定制作：木垛的灭火级别为 13A，尺寸为 1.3m×0.5m×0.56m。根据公安部天津消防研究所的有关实验数据，13A 木垛燃烧时最大热释放速率约为 1.1MW^[7]。同时，罐装标准丙烷气发生装置的火源最大热释放速率可达到 0.9MW，故本次实验的火源可达到的最大热释放速率约为 2MW。

因此，3 次实验所采用的火源热释放速率分别为 0.7MW、1.0MW、2.0MW，见表 1 所示。

表 1 玻璃幕墙全尺寸火灾实验统计

实验编号	火源设置	火源最大功率	时间	结果	备注
1	标准丙烷气加油盘	0.7MW	25'20"	内幕墙玻璃破碎	为保证氧气量，着火房间的门设为开启状态
2	标准丙烷气加油盘	1MW	20'10"	内幕墙玻璃破碎	为保证氧气量，着火房间的门设为开启状态

3	标准丙烷气 加木垛	2MW	23'40"	外幕墙 玻璃破碎	在着火房间内幕墙玻璃已破碎 的情况下进行实验
---	--------------	-----	--------	-------------	---------------------------

5 实验结果及分析

5.1 实验现象

从点火开始计时，并记下实验过程中发生的重要事件，同时采用 2 台摄像机在不同的角度全程记录火灾发展过程、幕墙状况和两层幕墙间烟气流动状况；用照相机拍摄重点部位及事件照片；用秒表记下各现象对应的时间。有关实验现象见表 2 和图 7 所示：

表 2 实验现象统计

实验序号	时间点	时间	事 件
第 1 次实验	1	0'0"	点 火
	2	2'06"	内幕墙玻璃边框处出现透火
	3	2'33"	火源左侧内幕墙内侧迎火面玻璃破碎（热电偶 T12 所在玻璃）
	4	2'50"	火源右侧内幕墙内侧迎火面玻璃破碎（热电偶 T13 所在玻璃）
	5	5'21"	内幕墙玻璃边框处透出大量烟气
	6	6'23"	内幕墙内侧玻璃出现大面积透火，火焰直接接触到的内幕墙外侧玻璃
	7	13'05"	火源左侧内幕墙外侧背火面玻璃破碎（热电偶 T2 下所在玻璃）
	8	13'40"	火源右侧内幕墙外侧背火面玻璃破碎（热电偶 T3 下所在玻璃）
	9	18'20"	内幕墙双层玻璃均已破碎、脱落，火焰和热烟气进入幕墙夹层
	10	25'20"	外幕墙及着火房间上层内幕墙玻璃均未出现破碎现象，实验结束
第 2 次实验	1	0'0"	点 火
	2	1'10"	内幕墙玻璃边框变形，缝隙处出现透火
	3	1'23"	火源右侧内幕墙内侧玻璃破碎（热电偶 T13 所在玻璃）
	4	2'22"	火源左侧内幕墙内侧玻璃破碎（热电偶 T12 所在玻璃）
	5	3'15"	内幕墙玻璃边框处严重变形，透出大量烟气
	6	3'45"	火源右侧内幕墙外侧玻璃破碎（热电偶 T3 下所在玻璃）
	7	4'25"	火源左侧内幕墙外侧玻璃破碎（热电偶 T2 下所在玻璃）
	8	16'30"	内幕墙双层玻璃均已破碎、脱落，火焰和热烟气进入幕墙夹层
	9	20'10"	外幕墙及着火房间上层内幕墙玻璃均未出现破碎现象，实验结束
第 3 次实验	1	0'0"	点 火
	2	1'05"	实验房间内烟气层迅速下降，火焰和热烟气进入幕墙夹层
	3	2'25"	高温气流呈贴近外幕墙内侧流动的趋势，最终上升到顶层排出
	4	5'10"	火源最右侧内幕墙内侧玻璃破碎（热电偶 T14 所在玻璃）
	5	5'55"	火源最左侧内幕墙内侧玻璃破碎（热电偶 T11 所在玻璃）
	6	6'40"	火源最右侧内幕墙外侧玻璃破碎（热电偶 T4 下所在玻璃）
	7	7'37"	火源最左侧内幕墙外侧玻璃破碎（热电偶 T1 下所在玻璃）
	8	8'07"	实验房间内幕墙玻璃铝合金框均严重变形，透出大量烟气进入幕墙夹层
	9	8'53"	火源右侧外幕墙内侧玻璃破碎（热电偶 T7 所在玻璃）
	10	9'40"	火源左侧外幕墙内侧玻璃破碎（热电偶 T10 所在玻璃）
	11	10'15"	火源右侧外幕墙内侧部分玻璃脱落，火焰直接烧向夹胶层
	12	10'25"	火源右侧外幕墙双层玻璃内夹胶着火
	13	11'35"	火源右侧外幕墙外侧玻璃破碎
	14	14'45"	火源右侧外幕墙外侧部分玻璃脱落
	15	16'25"	夹胶层继续燃烧并向上蔓延，外幕墙玻璃不断脱落，夹层内部分烟气直接排向大气
	16	23'40"	木垛燃烧完毕，实验结束



图 7 实验过程相关照片

5.2 实验数据整理

1) 第 1 次实验

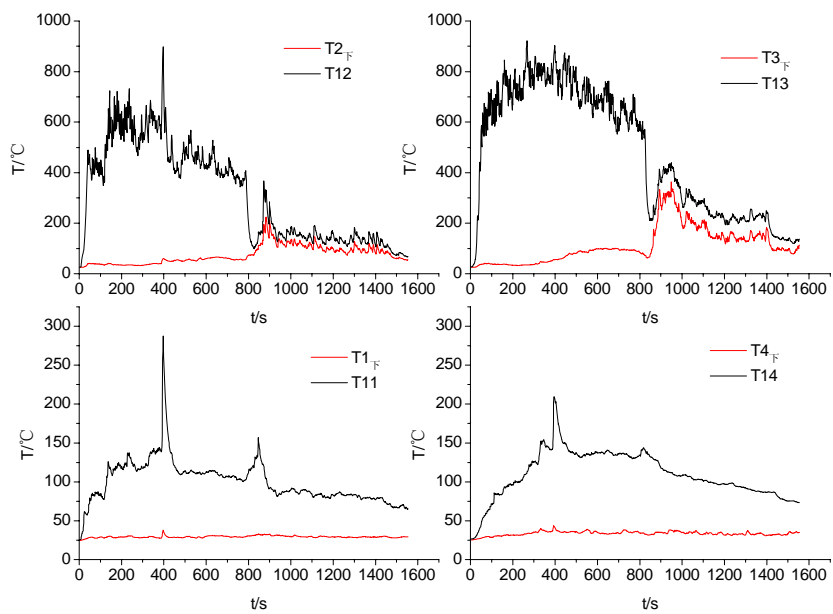


图 8 一层房间内幕墙内外侧热电偶温度

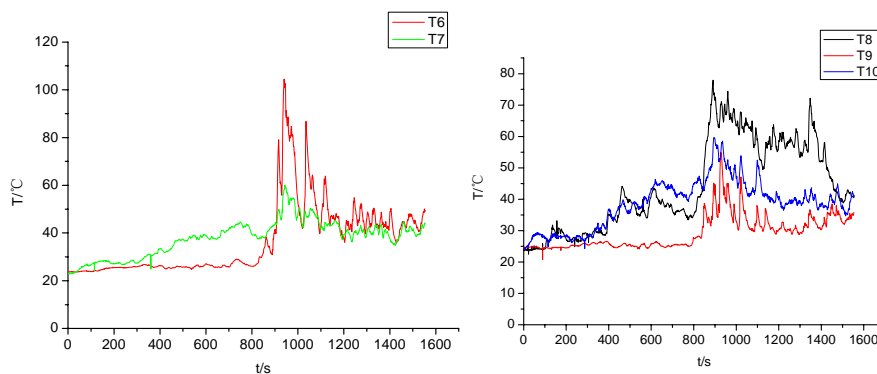


图 9 外幕墙内侧热电偶温度

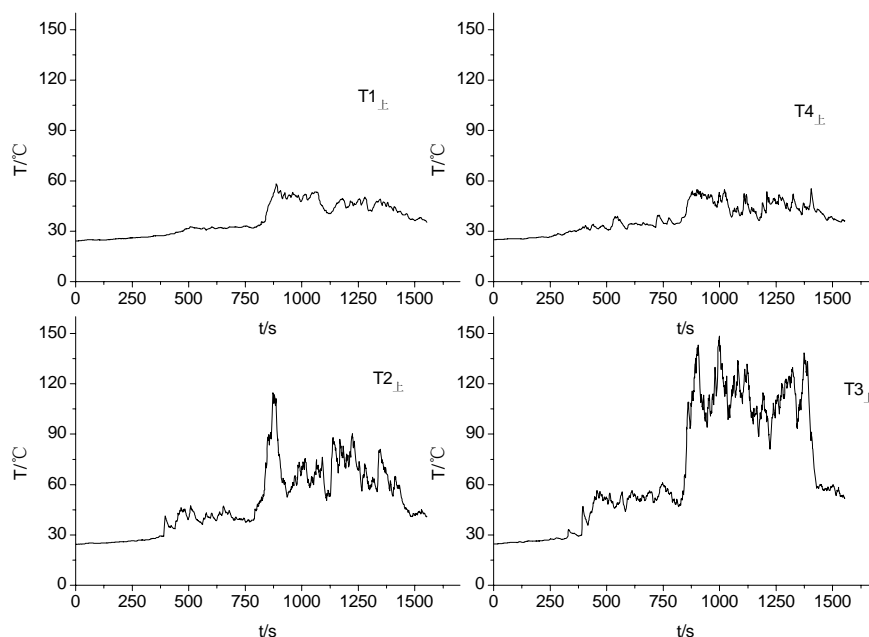


图 10 二层房间内幕墙外侧热电偶温度

实验中火源左右两侧内幕墙内侧玻璃在 153s~180s 时破裂，对应的迎火面温度分别为 600℃和 800℃左右；在约 13min 时，内幕墙外侧玻璃破碎，对应的背火面温度分别约为 200℃和 400℃。

二层房间内幕墙玻璃外侧的温度在下部幕墙破碎后显著上升，其中靠近火源中部两块玻璃的外侧最高温度达到 150℃。

内幕墙玻璃破碎前，在竖直方向外幕墙内侧玻璃因离火源距离远近不同温度由下向上逐渐降低。当内幕墙玻璃破碎后，外幕墙内侧中上部温度高于下部温度。由于烟气流出内幕墙时具有一定的水平速度，呈贴近外幕墙内侧流动的趋势，先接触到中上部外层玻璃，导致其温度升高，900s 时外幕墙内层最高温度约为 110℃。

2) 第2次实验

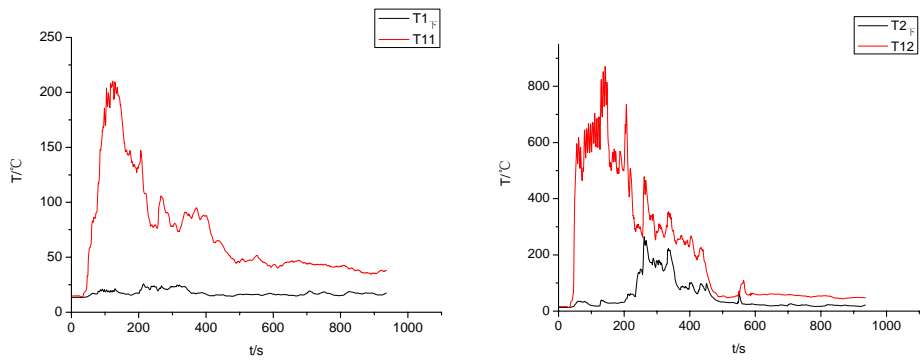


图 11 一层房间内幕墙内外侧热电偶温度

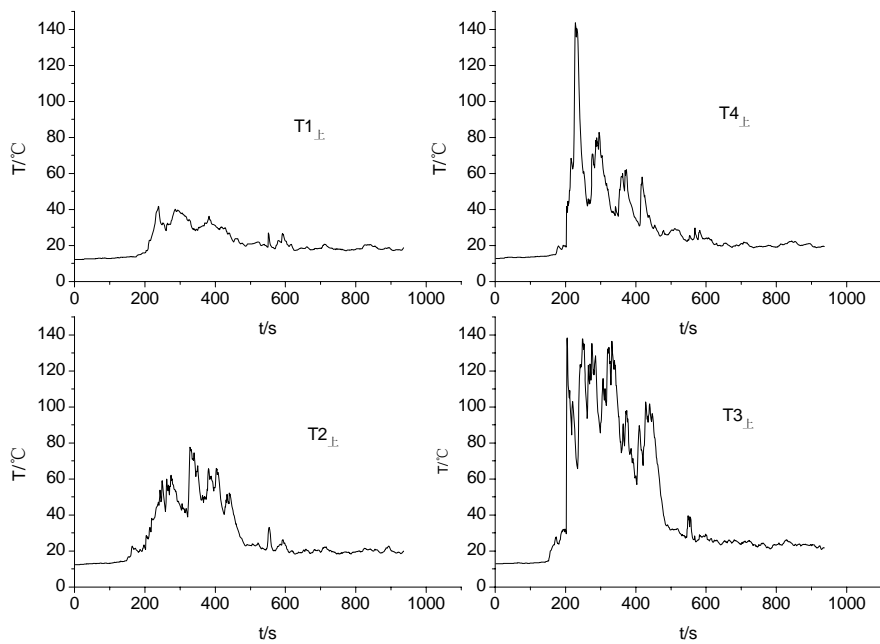


图 12 二层房间内幕墙外侧热电偶温度

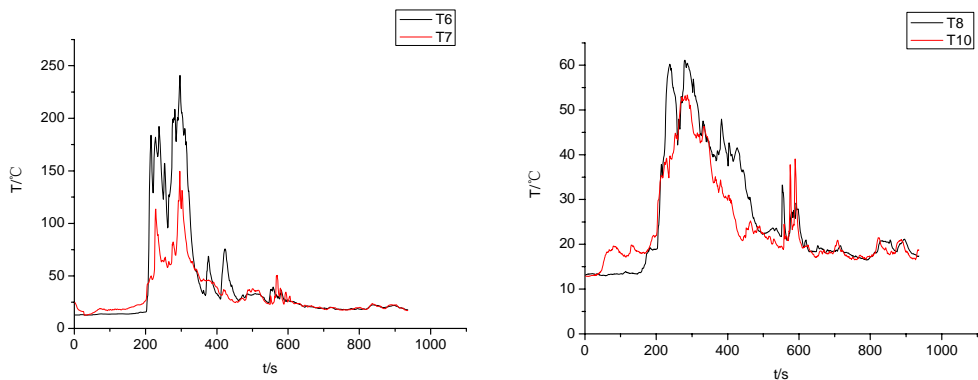


图 13 外幕墙内侧热电偶温度

实验中内层幕墙破碎时间约在 93s~120s，玻璃破碎时的温度在 600~800°C 之间。

内幕墙玻璃破碎后，烟气进入幕墙夹层，实验房间上方外幕墙内侧温度要高于内幕墙外侧温度，分别为 200°C 和 140°C。这种现象说明烟气在两层幕墙之间上升过程中，内幕墙玻

璃与气流高温区的距离比外幕墙与高温区的距离远，因此烟气在幕墙夹层内呈贴近外幕墙内侧流动的趋势。

3) 第3次实验

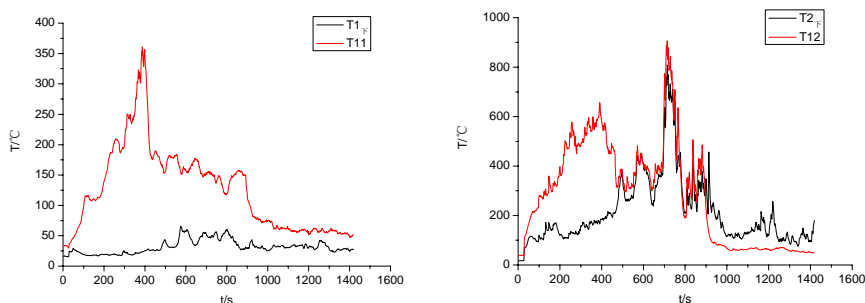


图 14 一层房间内幕墙内外侧热电偶温度

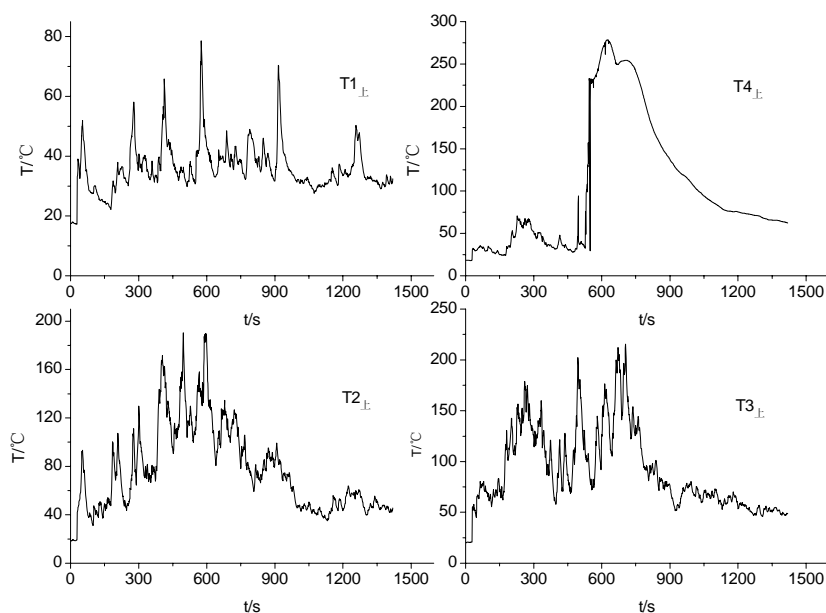


图 15 二层房间内幕墙外侧热电偶温度

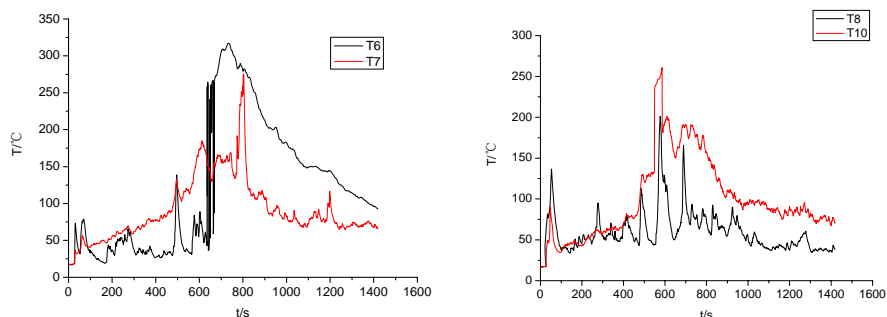


图 16 外幕墙内侧热电偶温度

实验是在内幕墙已破碎的情况下进行的，实验后 400s 之前，火源附近内幕墙内侧迎火面温度略高于外侧背火面温度；400s 后，火源周围区域基本达到热平衡，火源附近内幕墙内外两侧温度值趋于一致，其最高温度约为 900℃。

在幕墙夹层，二层房间内幕墙外侧玻璃的温度在约 600s 时达到最大值，约为 200℃；外幕墙内侧玻璃也在约 600s 达到最大值约 300℃，高于内幕墙外侧温度，与前 2 次实验所的结论一致。随着外幕墙的破裂，烟气在高温气体产生的热压作用下喷出外墙，直接排入外部空间，幕墙夹层内的温度逐渐降低。

6 结论

1) 在 0.7MW、1MW、2MW 火源下，内幕墙的迎火面玻璃均会在 3min 内破碎。背火面玻璃的破碎时间取决于火源大小，加大火源时，可以使背火面玻璃的破碎时间大大提前；致使玻璃破碎的温度为 600~800℃；

玻璃幕墙内外层钢化玻璃破碎时呈蜂窝晶莹状，其整体形状不会遭到破坏，各碎片均粘在一块，随着温度的不断升高，玻璃会因高温而融化、脱落；

2) 着火房间的内幕墙玻璃破碎后，烟气由于射流作用而进入幕墙夹层时具有一定的水平速度，先撞击到外幕墙，然后呈贴近外幕墙内侧流动的趋势向上蔓延，直到溢出至室外。外幕墙内侧温度高于内幕墙外层温度；

着火房间上部楼层的内幕墙玻璃最高温度未超过 200℃，外幕墙内侧最高温度未超过 300℃，烟气不足以使上部楼层的内外幕墙玻璃破碎；

3) 外幕墙采用双层夹胶钢化玻璃，其夹胶层内的胶体极易着火。一旦外幕墙内层迎火面玻璃破碎，火焰与烟气组成的热气流接触到胶体，夹胶层将会迅速燃烧并向上蔓延，并导致外幕墙外侧背火面玻璃破碎、融化、脱落；

当外幕墙破裂后，烟气在高温气体产生的热压作用下喷出外墙，只有少量烟气进入内外幕墙之间的夹层。幕墙夹层间温度降低，对起火层以上各层内、外幕墙的影响将大为减少。因此，外幕墙的破裂对降低幕墙夹层内的烟囱效应，减缓火灾和烟气的垂直蔓延速度起到积极的作用；

4) 内幕墙固定采用断桥隔热式铝合金框，在内幕墙玻璃破碎前，铝合金框在 300~400℃时强度下降，发生严重变形，导致烟气透过玻璃与铝合金框之间缝隙流入幕墙夹层。

参考文献

- [1] 李俊英. 热通道玻璃幕墙的分析与展望[J]. 山西建筑, 2002, 28(7): 71-72
- [2] 赵西安. 幕墙工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996
- [3] [英]Michael Wigginton 编著. 李冠钦译. 建筑玻璃[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [4] 杨萍. 玻璃幕墙的消防设计要求[J]. 消防科学与技术, 2005, 24(1): 67-68
- [5] 郭大刚, 何炜, 许文祥. 双层幕墙性能化消防设计初探[J]. 消防科学与技术, 2004, 23(4): 341-344
- [6] Fire Experiment Results, <http://www.fire.nist.gov/fire/fires/fires.html>
- [7] 公安部天津消防研究所, 地铁防排烟设计参数及烟气控制系统研究报告[R], 国家十五滚动科技攻关项目 (专题编号: 2004BA803B04-2), 2006

Full Scale Fire Test on the Double Skin Facade

NI Zhao-peng¹, LU Shi-chang¹, ZHI Hui-qiang¹, Wang Lei²

(1. Tianjin Fire Research Institute of Ministry of Public Security, Tianjin, 300381;

2.China University of Mining & Technology, Xuzhou, 221008)

Abstract: Describes the fire protection challenge brought by the double skin facade and a study of the influence of this kind of facade on the potential of vertical fire spread, the full scale fire tests

were conducted and three cases were simulated: the center burn of mattress in the guest room; on the corner burn of mattress; another case on the whole burn of the guest room. Based on the results, it is found that there was a potential of fire spread via the cavity of the double skin facade, and the fire resistance characteristics on the double skin façade, for example the critical breaking temperature and breaking time etc, were given.

key words: double skin facade; full scale fire test; fire spread; smoke movement, critical breaking temperature

第一作者简介: 倪照鹏（1966—）：男，江苏泗洪人，公安部天津消防研究所规范研究室主任，研究员，主要从事建筑防火与消防安全工程、建筑消防技术标准化的研究。

基金项目: 公安部应用创新计划项目资助（项目编号：2006yycxTJXF013）

联系人: 路世昌 **地址:** 天津市南开区卫津南路110号公安部天津消防研究所规范室

邮编: 300381 **电话:** 022-23387424

E-mail: lushichang@tfri.com.cn