

水喷淋保护下单片防火玻璃耐热性能实验研究

疏学明, 邵 荃, 苏国锋, 陈 涛, 杨 锐, 申世飞, 袁宏永

(清华大学公共安全研究中心, 北京 100084)

[摘要] 针对单片防火玻璃在实际使用中背火面温度高而影响人员疏散的缺点, 提出水喷淋保护方案。研究表明: 在水喷淋保护下单片防火玻璃背火面温度和热辐射通量大大低于无水喷淋保护下的相应数值; 快速响应水喷头在高温烟气作用下能够自动启动, 可以长时间地保护防火玻璃, 而且不会影响到防火玻璃背火面的人员安全疏散。

[关键词] 火灾; 防火玻璃; 水喷淋; 温度; 热辐射通量

[中图分类号] TU111.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)06-0064-05

在现代大型复杂建筑中玻璃使用面积占据建筑外墙面积的30%~40%, 个别的甚至超过建筑外墙总面积的50%~60%^[1]。然而普通玻璃遇火后很快炸裂、脱落, 致使火灾迅速蔓延, 如普通浮法玻璃遇火后1 min即会炸裂, 钢化玻璃遇火后5~8 min会炸裂^[2], 而经过物理和化学工艺对浮法玻璃进行处理而制成的防火玻璃则具有良好的耐热性能和抗热炸裂性能, 能有效阻止火焰与烟雾的蔓延。单片防火玻璃透光性好、强度高、有良好的耐火性能, 被大量应用于幕墙、防火隔墙、防火隔断、防火窗、防火门等方面。

防火玻璃遇火后会炸裂, 但由于防火层对玻璃具有较强的粘接性, 炸裂的玻璃碎片被粘在另一块玻璃板上, 仍然保持整体形态。同时, 随着受火时间加长, 防火层开始发泡, 形成一定厚度的泡沫层起到隔热作用, 同时放出相当量的水蒸气吸收大量热, 减缓热量的传递, 这样就能有效地阻挡火灾的蔓延, 起到保护背火面财物及人员的作用^[3]。

防火玻璃可分为复合防火玻璃和单片防火玻璃, 分别由多层或单层玻璃构成。单片防火玻璃以其优良的通透性和结构轻巧的特点, 使用率较高。尽管单片防火玻璃遇到火灾时具有防火功能, 在一定的耐火时间内不会炸破, 从而隔断火焰和烟气蔓延, 但是, 它受热同时具有的高热辐射照度, 会影

响到周围环境, 使它的应用受到较大的限制。较高的背火面温度和热辐射可能会引燃背火面的可燃物, 特别是靠近人员疏散通道的单片防火玻璃, 较高的背火面温度会影响人员安全疏散。人体对辐射热耐受能力的测试研究表明, 人体对火灾环境的辐射热的耐受极限是2.5 kW/m², 在此环境下人体耐受时间为30 s; 当热辐射强度增加到10 kW/m²时, 人体耐受时间仅为4 s。为了确保人员安全疏散通道的安全性, 应降低防火分区中单片防火玻璃的背火面温度和热辐射通量。

为了解决防火玻璃应用于防火分区中可能带来的问题, 使之不影响建筑物的防火安全, 加拿大国家火灾实验室(NFL)和国家研究院(NRC)与一些工厂合作, 共同开发了采用水膜(water film)保护窗玻璃的方法^[4-6], 而国内尚未开展相关研究, 作者着重研究水喷淋保护下单片防火玻璃的耐热性能, 通过实验测试了不同工况下单片防火玻璃温度和热辐射通量, 给防火玻璃工程设计和应用提供了实验依据。

1 防火玻璃测试实验台

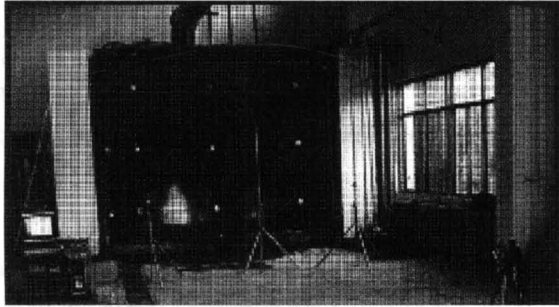
清华大学公共安全研究中心受消防局和用户委托承建了防火玻璃实体火灾测试实验室, 根据建筑材料防火试验国家规范要求^[7-9], 参照国外相关测

[收稿日期] 2005-08-22

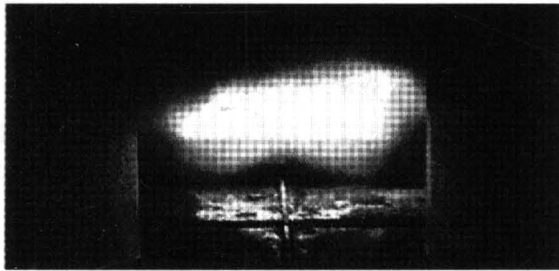
[基金项目] “十五”攻关资助项目(2004BA803B03)

[作者简介] 疏学明(1970-), 男, 安徽枞阳县人, 清华大学公共安全研究中心助理研究员

试标准^[10,11],对单片防火玻璃的耐热性能进行测试。如图1所示,实验台由燃烧系统、测量系统、供水系统、排烟系统和数据采集系统组成。



(a) 燃烧室背面图(玻璃幕墙)



(b) 燃烧室正面图(排烟口)

图1 燃烧室实物图

Fig.1 Photos for test room

1.1 燃烧系统

实验台的燃烧系统由燃烧室、油池、油泵及输油管道组成。

实验在一个长70 m,宽24 m,高12 m的大空间建筑物内实施,地板和侧墙均为钢筋混凝土结构,在大空间中部有一自上而下的隔断墙,将大空间一分为二。依照隔断墙建造燃烧室的有效尺寸(长×宽×高)为:5 500 mm×5 000 mm×3 500 mm,侧墙采用240 mm厚砖墙结构,顶部采用防火板和高温耐火纤维复合结构。燃烧室一端侧墙上安装防火玻璃幕墙,另一端是2 000 mm×2 000 mm的排烟口,烟气通过湿式除尘净化系统处理后排放到大气中。防火玻璃幕墙由2块3 300 mm×2 200 mm×12 mm的高强度单片防火玻璃安装在U型槽钢内构成,U型槽内依次填充硅酸铝耐火纤维、防火膨胀密封条、泡沫等材料,两块玻璃缝隙处采用防火密封胶密封,玻璃框架采用L40 mm×4 mm角钢和30 mm×3 mm扁钢与整个防火玻璃幕墙的外框架焊接固定,整个防火玻璃幕墙的外框架由140 mm×58 mm的槽钢对焊成的方管焊接而成。

实验采用柴油火模拟真实火灾,油池有效尺寸(长×宽×高):1 280 mm×780 mm×500 mm,油池由5 mm厚的钢板焊接成的,内壁粘贴116 mm高温耐火砖,在油池底部安装4个车轮,用于调整油池和防火玻璃的距离;在油池一侧中间位置上安装直径30 mm的输油管道,与燃烧室外部的输油管道与流量计、球阀及油泵相连,通过油泵将油箱中柴油匀速泵入油池中。在油池里放置一些沸石,以防止扬沸现象。

热释放速率按下式计算:

$$\dot{Q} = \phi \times \dot{m} \times \Delta H$$

其中: ϕ —燃烧效率因子,一般取0.7; ΔH —可燃物热值,柴油热值为42 000 kJ/kg; \dot{m} —耗油速率(kg/s);

经流量计测试,该实验体积耗油速率为200 L/h,根据柴油密度0.838 kg/L计算得到的质量油耗速率为0.047 kg/s,因此,实验中燃油的热释放速率为1.37 MW,满足用户提出的不低于1.0 MW的火灾功率要求。

1.2 测量系统

实验台的测量系统由热电偶、热辐射通量计以及水压、水流量和耗油量记录仪表组成。安装在供水管道上的水压表、水流量表分别记录了水喷头的压力和流量,安装在供油管道上的油表记录每次实验的瞬时流量和总耗油量。

整个实验台共安装了26支热电偶,分别记录火焰温度、排烟口烟气温度、防火玻璃受火面和背火面温度。其中2根B型热电偶用于测量火焰温度,其余24根K型热电偶,丝径为0.75~1.00 mm,其热端伸出瓷管25 mm,测点应避开火焰及水喷淋的直接冲击。所有的热电偶补偿导线均放置于钢管内,并填充耐火硅酸铝纤维。

实验中采用Vatell公司的BF03型热辐射通量计,其灵敏度为55.77 mV/(W·cm⁻²),在150℃环境中能够连续使用,在200℃环境中可以短时间使用。通量计安装在距离防火玻璃中心3 m、距离地面1.2 m处,其热敏面正对防火玻璃,连续记录防火玻璃背火面中心的热辐射通量值(见图2)。

1.3 供水系统

实验台的供水系统由水箱、变频水泵、管道和水喷头组成。水箱容量30 m³,最高工作压力1.2 MPa,在0.9 MPa压力下流量可达65 L/s。采用变频水泵恒压供水,在进燃烧室前的供水管道上安装

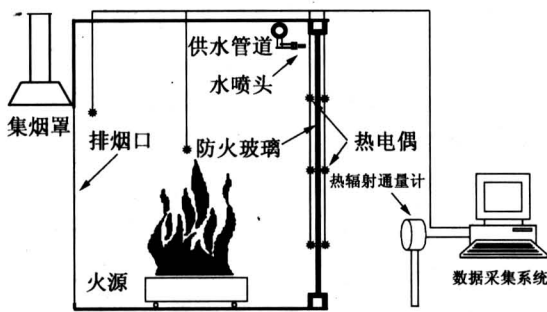


图 2 单片防火玻璃测量装置示意图

Fig.2 Schematics of measurement set of single-pane fire-resistant glass

了水量和压力记录仪表。

消防自动喷水灭火系统中常用的水喷头有玻璃球洒水喷头、水幕喷头、水雾喷头、ESFR 早期抑制快速响应喷头、大水滴洒水喷头、易熔合金喷头、细水雾喷头等多种类型，实验中分别选用了玻璃球洒水喷头、水幕喷头和水雾喷头，喷头和玻璃水平距离为 150 mm，方向正对玻璃。喷射角 120° ，动作温度 68°C ，喷头流量为 $20\sim 40\text{ L/min}$ 。水喷头与防火玻璃之间的夹角调节范围为 $0\sim 90^\circ$ ，水喷头距离玻璃顶部的垂直距离的调节范围为 $-200\text{ mm}\sim 200\text{ mm}$ 。

1.4 排烟系统

实验台排烟系统由集烟罩、排烟管道、除尘器、排烟风机和烟囱组成。设计排烟量为 $20\ 000\text{ m}^3/\text{h}$ ，管道直径为 0.8 m 。除尘净化器采用斜孔板湿式除尘系统，相对于干式除尘来说除尘效率较低、用水量大，但是克服了干式除尘系统中常见的滤袋堵塞现象，可用于高温烟气除尘系统中。

1.5 数据采集系统

实验台的数据采集系统由信号放大器、数据采集卡和计算机组成。

热电偶输出的电压信号，经信号放大处理后，送入数据采集卡经过 A/D 转换成数字信号后送入微型计算机进行信号分析、处理和储存。实验采用的研华 PCI-1713 数据采集卡，是 PCI 总线隔离高速模拟量输入卡，提供了 32 个模拟量输入通道，采样频率可达 100 KS/s ，12 位分辨率及 $2\ 500\text{ V}$ 的直流隔离保护，32 路单端或 16 路差分模拟量输入，该采集卡具有分辨率高、采样速率快、可编程、高增益的优点，可以满足多通道数据同时采集的要求。

2 实验测试与结果分析

2.1 实验测试

实验开始阶段，在确认实验台各个系统工作正常的情况下，开启油泵和排烟系统，点火后立即启动测量装置，开始实验测试。如果采用水幕喷头和高速水雾喷头等开式喷头时，当靠近玻璃表面的温度达到 70°C 时，则手动开启水喷淋系统。如果采用快速响应玻璃球洒水喷头时，则在室内火灾烟气温度作用下自动启动水喷淋系统。及时记录水流量、水压和耗油量，在计算机上保存各测点数据。观察试样是否开裂、变形，以及背火面是否出现烟雾并全程录像，每隔 5 min 对防火玻璃照相一次，供后续分析处理。

2.2 实验结果与分析

实验中具体测试了火源上方温度、排烟口温度、单片防火玻璃受火面和背火面温度、玻璃背火面热辐射通量值，测试结果分析如下。

2.2.1 火源上方烟气温度 测量火源上方烟气温度的热电偶安装在距离地面 2 m 处，显示的温度在 $805\sim 810^\circ\text{C}$ 左右，温度波动较小（图 3）。

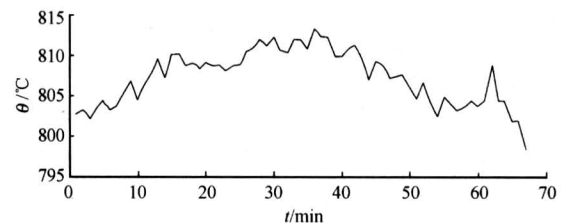


图 3 火源上方烟气的温度曲线

Fig.3 Temperature curve of smoke over flame

2.2.2 排烟口烟气温度 排烟口热电偶安装在距离地面 1.5 m 处的排烟口正中位置上，测量烟气温度在 225°C 左右（图 4）。

2.2.3 防火玻璃受火面中心点温度 由于考虑到水喷淋的影响，热电偶安装在燃烧室内距离防火玻璃 0.5 m ，距离地面 1.5 m 处，显示的温度值在 410°C 左右波动（图 5）。

2.2.4 防火玻璃背火面中心点温度 热电偶安装在防火玻璃背火面正中位置上，测量的温度值在 $45\sim 52^\circ\text{C}$ 范围内波动（图 6）。

2.2.5 防火玻璃背火面死角点温度 由于水喷头安装位置的原因，防火玻璃左上角和右上角的水流量小，该位置上玻璃受火面和背火面温度都较高，

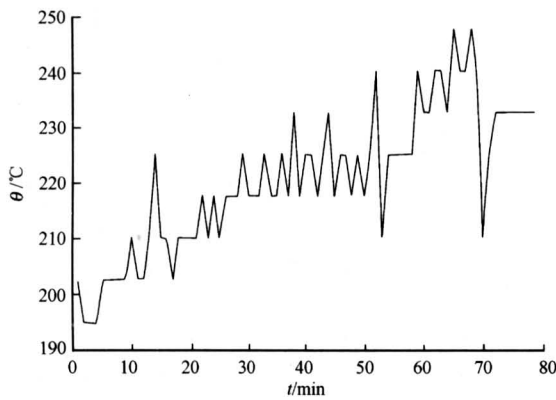


图 4 排烟口烟气的温度曲线

Fig.4 Temperature curve of smoke on smoke outlet

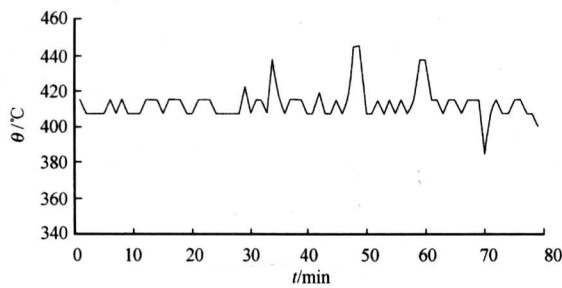


图 5 防火玻璃受火面中心点的温度曲线

Fig.5 Temperature curve of smoke on center area on forward-side of glass

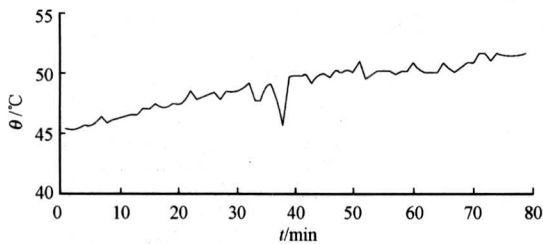


图 6 玻璃背火面中心点的温度曲线

Fig.6 Temperature curve of smoke on center area on backside of glass

称为水喷淋保护的死角点。由于水流量的差异，死角点温度明显高于其他各点的温度，在实验测试过程中其温度在测试初期 55℃ 稳定一段时间后有所上升（图 7）。

2.2.6 防火玻璃受火面死角点温度 在实验测试过程中受火面死角点温度不断缓慢上升，由初期 150℃ 上升到 190℃（图 8）。

2.2.7 防火玻璃背火面边缘中心点温度 实验测试的防火玻璃背火面边缘中心点温度在 50℃ 上下

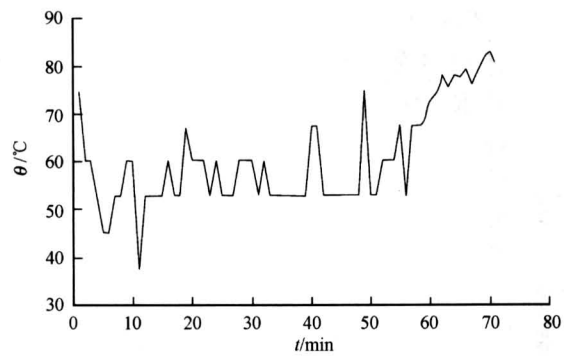


图 7 玻璃背火面死角点的温度曲线

Fig.7 Temperature curve of smoke on unprotected area on back side of glass

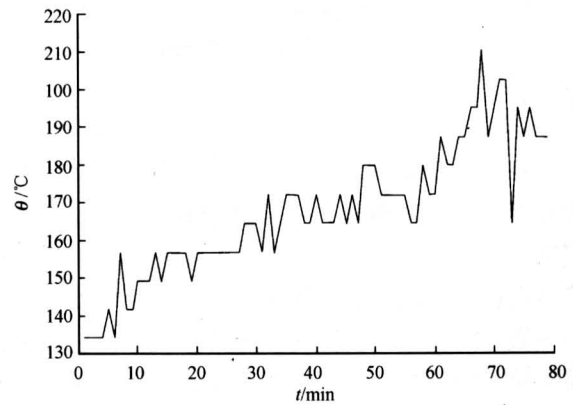


图 8 玻璃受火面死角点的温度曲线

Fig.8 Temperature curve of smoke on unprotected area on forward side of glass

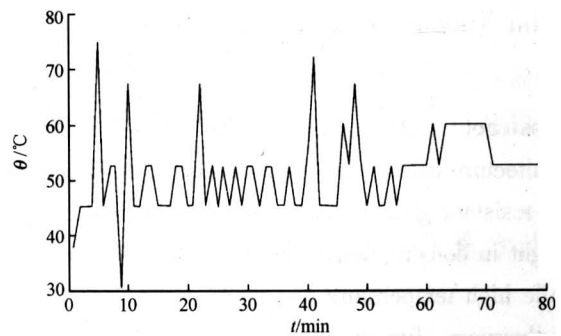


图 9 玻璃背火面边缘中心点的温度曲线

Fig.9 Temperature curve of smoke on margin area on back side of glass

波动，基本上对人体没有影响（图 9）。

2.2.8 防火玻璃背火面热辐射通量 实验测得的防火玻璃背火面中心点 3 m 处的热辐射通量平均值在 $5 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ ，仅为国家规范^[9]中规定的临界辐

射通量 (0.42 W/cm^2) 的 1.2%, 是人体对火灾环境辐射热的耐受极限 (2.5 kW/m^2) 的 2%, 对人员安全疏散无任何影响 (图 10)。

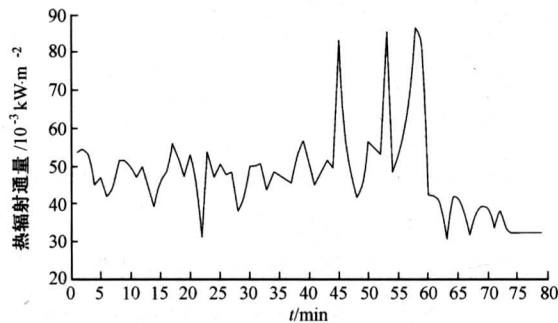


图 10 玻璃背火面中心点的热辐射通量曲线

Fig.10 Thermal radiation flux curve on center area on back side of glass

3 结论

在水喷淋保护下, 单片防火玻璃不仅能阻隔火灾和烟气的直接蔓延, 而且具有良好的隔热性能, 其背火面温度在 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 背火面的热辐射通量只有国标规定的临界辐射通量的 1.2%, 对人员安全疏散无任何影响, 因此, 采用水喷淋保护方法克服了单片防火玻璃应用中的欠缺, 是单片防火玻璃工程应用的必要辅助措施。

实验中快速响应水喷头的水压低、流量小、保护效果好, 在高温烟气作用下能够自动启动, 并能较长时间地保护防火玻璃, 在工程中使用简单方便。

参考文献

- [1] 严锡泉. 大面积垂直玻璃窗洞的火灾蔓延危害性及对策[J]. 消防科技, 1994, 4: 17~18
- [2] 黄庆文. 高强度单片防火玻璃在建筑中的应用[J]. 建筑学报, 2002, 2: 57~58
- [3] 耿平, 防火玻璃[J]. 玻璃, 1997, 24(2): 41~43
- [4] Reihardson J K, Oleszkiewicz I. Fire tests on window assemblies protected by automatic sprinklers [J]. Fire Technology, 1987, 23(2): 115~132
- [5] Kim A K, Taber B C, Loughed G D. Sprinklerprotection of exterior glazing[J]. Fire Technology, 1998, 34(2): 116~138
- [6] Kim A K, Loughed G D. The protection of glazing systems with dedicated sprinklers [J]. Journal of Fire Protection Engineering, 1990, 2: 49~59
- [7] GB15763. 1-2001 建筑用安全玻璃 防火玻璃[S]
- [8] GB/T 9978-1999 建筑构件耐火试验方法[S]
- [9] GB12513-1990 镶玻璃构件耐火试验方法[S]
- [10] ISO 9705: 1993 Fire Tests on Building Materials and Structures[S].
- [11] ISO 9705: 2001 Reaction to Fire Tests-Full Scale Room Tests for Surface Products[S].

Experimental Study of Single-pane Fire-resistant Glass Performance with Sprinkler Protection

Shu Xueming, Shao Quan, Su Guofeng, Chen Tao, Yang Rui, Shen Shifei, Yuan Hongyong
(Center for Public Safety Research, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[Abstract] On account of fine appearance and lucidity of glass, fire-resistant glass has been widely used as architecture exterior materials and fire-resistant compartmentation in modern buildings. Especially, single-pane fire-resistant glass is more widely used than compounding one because of its higher light transmission and less weight in construction. However, single-pane fire-resistant glass can only prevent the spread of fire and smoke, while high temperature and thermal radiation flux on its rear surface may cause a new fire on the protected side. Furthermore, fire-resistant glass is usually quite close to evacuation passage, so it will be harmful to security evacuation. These shortcomings prevent single-pane fire-resistant glass from using in practice. This article describes the experimental study of single-pane fire-resistant glass performance with sprinkler protection. The test setup was introduced in detail, and the test results were discussed. It is showed that the temperature and thermal radiation flux on the protection side of single-pane fire-resistant glass with sprinkler protection are quite lower than those without sprinkler condition. The fast responding sprinkler can automatically spray well-proportioned water and protect certain area. The study of this article may be of benefit to the evacuation calculation in performance-based fire design and engineering application of fire-resistant glass.

[Key words] fire; fire-resistant glass; sprinkler protection; temperature; thermal radiation flux