建筑玻璃幕墙与主体结构连接的火灾危险性分析

张慧勤[1] 胡克旭[2] 李宗沅[2] 白 雪[3,*]

（1.浙江正泰新能源开发有限公司，杭州 310053；2.同济大学土木工程学院，上海 200092；
3.上海城建职业学院，上海 200438）

摘 要 本研究以玻璃幕墙与主体结构的连接为研究对象，采用Pyrosim软件，基于t^2非稳态火灾增长模型，对行政办公室、综合办公室、商场服装店、宾馆客房和住宅卧室五种典型建筑空间进行火灾全过程数值模拟，获得幕墙连接处的温度场；进而利用ABAQUS有限元软件对最危险火灾场景下混凝土基体和连接件内部温度进行模拟，考虑高温下材料强度劣化，验算幕墙连接处钢角码、螺栓、埋件（爪式、槽式、化学锚栓）及焊缝的承载力。结果表明：火灾下防火封堵处的温度达到600 ℃以上，目前工程上普遍采用的防火封堵（由镀锌钢板和岩棉组成）在火灾下存在脱落风险；外露的连接部件（钢角码、螺栓、焊缝等）及化学锚栓埋件火灾下的承载力不满足要求，而爪形和槽式预埋件的承载力基本能满足要求。建议工程中应优先采用预埋式连接，并应提高防火封堵的耐火性能、增设连接件的防火保护、适当提高连接件承载力冗余度，以确保火灾下幕墙连接的安全性。

关键词 玻璃幕墙，火灾模拟，连接件，承载力，火灾危险性

中图分类号：TU375.4 **文献标志码**：A **DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.202604.0005

Fire Risk Analysis of the Connections between Building Glass Curtain Walls and Main Structures

ZHANG Huiqin[1] HU Kexu[2] LI Zongyuan[2] BAI Xue[3,*]

（1.Zhejiang Chint New Energy Development Co.,Ltd., Hangzhou 310053, China;
2.College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3.Shanghai Urban Construction Vocational College, Shanghai 200438, China）

Abstract This study investigates the fire performance of connections between curtain walls and primary structures. Utilizing Pyrosim software and the t^2 quasi-steady fire growth model, numerical simulations of the full fire development process were conducted across five representative architectural spaces: administrative offices, general offices, retail apparel stores, hotel rooms, and residential bedrooms, to characterize the temperature field at the connection interface. Subsequently, ABAQUS finite element analysis was employed to simulate the internal temperature profiles of concrete substrates and connectors under the most severe fire scenario. Accounting for high-temperature-induced material degradation, the load-bearing capacities of critical connection components were evaluated, including steel angle brackets, bolts, embedded parts (cast-in claw, cast-in channel, and chemical anchors), and welds. Results indicate that temperatures at fire-stop seals exceed 600 ℃ during fire exposure, revealing a detachment risk in conventional seal assemblies comprising galvanized steel sheets and rock wool. Exposed components (e.g., steel brackets, bolts, welds) and chemical anchor systems fail to meet fire-resistance requirements, whereas cast-in claw and channel embedded parts demonstrate adequate capacity. The study recommends prioritizing cast-in embedded systems in design,

收稿日期：2025-12-02

作者简介：张慧勤（1996-），女，硕士，主要研究方向为工程结构抗火性能。E-mail：ncuskzhanghuiqin@163.com

[*] **联系作者**：白 雪（1970-），女，硕士，副教授，主要研究方向为工程建筑施工技术及城市更新。E-mail：253577104@qq.com

enhancing the fire resistance of fire-stop seals, applying supplementary fire protection to connection elements, and incorporating appropriate capacity redundancy to ensure structural integrity under fire conditions.

Keywords glass curtain wall, fire simulation, connector, bearing capacity, fire risk

0 引 言

随着人们对于建筑外围护结构的要求越来越高，建筑幕墙开始被广泛应用，但由于其结构和所用材料相对特殊，建筑幕墙在设计和使用过程中存在较为严重的防火安全隐患。目前国内外对于建筑幕墙抗火性能的研究，主要针对幕墙面板、保温材料等，极少从宏观角度去考虑整体幕墙结构。很多设计人员在对幕墙进行设计的时候也只关注面板和骨架，而忽略连接部分的计算。但火灾下建筑结构的破坏失效往往是由连接破坏失效导致的[1]，若幕墙结构与主体结构的连接部分在火灾中受损失去承载能力，也会造成严重后果，所以幕墙连接也是幕墙抗火需要考量的重要部位。

建筑幕墙主要分为玻璃幕墙、石材幕墙和金属幕墙三种。防火规范要求，石材和金属幕墙等非透明的幕墙结构，需在其内部设置基层墙体，这些实体墙在火灾时可有效阻止火势或浓烟进入幕墙与建筑间的缝隙[2]，保护其中的幕墙连接件。而玻璃幕墙为了采光透光，内部无基层墙体，为保护幕墙连接件，规范要求在缝隙处设置防火封堵，但防火封堵自身在高温下强度会大幅降低或出现碳化现象，发生脱落或失去阻火作用，故玻璃幕墙中的连接件在火灾中会处于比较危险的境地。

本文基于上述情况，选择火灾安全隐患最大的玻璃幕墙为主要研究对象，以幕墙与主体结构的连接部分为重点，通过数值模拟和理论计算对其抗火性能进行了研究和分析，并提出提高其抗火性能的对策，用以指导实际工程。

1 火灾温度场数值模拟

1.1 火灾场景选取与设计

玻璃幕墙主要应用于办公楼、商场、宾馆和住宅四种类型的建筑，考虑到最不利情况，应选取上述四种类型的建筑中火灾危险性最大的房间类型，对其进行火灾场景设计和模拟[3]。

基于王能胜[4]、王金平等[5]对于上述四类建筑中各类型房间进行调研所得的数据，从样本数量、面积占比和火灾荷载密度三个方面进行综合比较，最终选取行政办公室、综合办公室、商场服装店、宾馆客房和住宅卧室作为代表性的火灾场景。

因为房间的空间几何尺寸对火灾的规模和严重程度有很大的影响，所以选定房间类型后，还需对各类型房间的尺寸进行设计。

王能胜[4]、李天等[6]对上述五种房间的尺寸和火灾荷载密度进行了调查统计，本文以样本数量最多的房间尺寸为参考依据，并结合实际，最终确定各房间的具体尺寸，火灾荷载密度值则取调研得到的平均值，并将最终各项取值列于表1。

表1 五种火灾场景的房间尺寸和火灾荷载密度

Table 1 Room sizes and fire load densities of five fire scenes

火灾场景	房间尺寸/m	门洞尺寸/m	火灾荷载密度/(MJ·m^{-2})
行政办公室	4.5×3.6×3.6	0.9×2.0	502.9
综合办公室	9.9×6.6×3.9	0.9×2.0×2.0	560.3
商场服装店	9.0×6.0×4.5	1.8×2.0	454.0
宾馆客房	7.8×4.5×3.6	0.9×2.0	516.3
住宅卧室	4.5×3.3×3.0	0.9×2.0	520.3

1.2 火灾曲线确定

要对火灾进行数值模拟，最重要的是进行火灾场景设计，其核心工作就是确定火灾曲线，即构建火源的热释放速率变化曲线。

1.2.1 火灾增长模型

要确定火灾曲线，首先要选择合适的数学模型。本文采用非稳态模型中最具代表性的t^2增长模型，它是目前最常被用来进行火灾模拟的模型。

火灾研究一般不考虑衰减阶段，所以在t^2增长模型中，根据室内火灾发展规律，可将热释放速率曲线简化为图1[7-8]。其中，增长阶段的曲线为$Q=\alpha t^2$，当热释放速率达到最大值后，进入充分发展阶段，热释放速率保持最大值不变。

所以要确定热释放速率曲线，只需确定三个关键参数，分别为火灾增长系数α、最大热释放速率Q和火灾时间t。

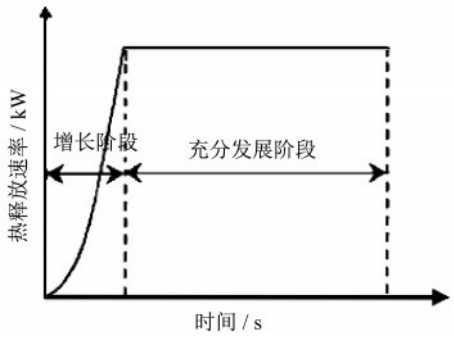


图1　t^2增长模型热释放速率简化曲线

Fig.1　Simplified curve of heat release rate in t^2 growth model

1.2.2　火灾增长系数

火灾增长系数可由下式计算得到[9]：

$$\alpha=\alpha_f+\alpha_m \tag{1}$$

式中：α_f代表火灾荷载密度产生的影响，$\alpha_f=2.6\times10^{-6}q^{5/3}$，$q$为火灾荷载密度（MJ/m^2），现已知火灾荷载密度，故α_f可以计算得到；α_m是墙面和吊顶的装修材料的影响，本文的五种火灾场景均采用B1难燃性材料，可查表得到α_m取值为0.014。

因此，最终得到各火灾场景的火灾增长系数α的值见表2。

1.2.3　最大热释放速率

本文根据轰燃条件确定火灾最大热释放速率，采用P.H.Thomas提出的公式进行计算[10]：

$$Q_{max}=7.8A_T+378A_0\sqrt{H_0} \tag{2}$$

式中：Q_{max}为最大热释放速率；A_T为室内所有表面的总面积之和；A_0为门窗等开口的总面积之和；H_0为门窗等开口中心点的高度。

但上式是通过对一个16 m^{2}大的房间进行实体火灾试验测量得到的，故针对16 m^{2}左右的小尺寸房间，上式计算结果较为精确，但对尺寸较大的房间，上式并不适用。因此，故有学者提出了下述公式对大尺寸房间的临界热释放速率进行计算：

$$Q_{max}=1\ 260A_0\sqrt{H_0} \tag{3}$$

对于选取的五种典型火灾场景，综合采用式(2)和式(3)计算最大热释放速率，最终结果列于表2。

1.2.4　火灾时间

在得到火灾增长系数和最大热释放速率后，由$Q=\alpha t^2$可求得增长阶段的时间，而充分发展阶段的时间可以根据火灾荷载总值和最大热释放速率计算得到，公式如下[11]：

$$t_2Q_{max}+1/3\alpha t_1^2=0.7qA \tag{4}$$

式中：t_1为增长阶段时间；t_2为充分发展阶段时间；A为房间内地板面积；其余同前。

最终计算得到各火灾场景下增长阶段和充分发展阶段的时间，列于表2。

表2　五种火灾场景的各参数值

Table 2　Values of each parameter of five fire scenes

火灾场景	火灾增长系数α	最大热释放速率/kW	增长阶段时间/s	充分发展阶段时间/s
行政办公室	0.096 7	1 273	115	4 480
综合办公室	0.113 0	4 536	200	5 649
商场服装店	0.083 7	4 536	233	3 783
宾馆客房	0.100 4	2 268	150	4 636
住宅卧室	0.101 5	1 140	106	4 743

1.3　火灾温度场模拟

利用Pyrosim软件对设计好的五种火灾场景分别进行建模，并设计以下两种工况：

（1）有防火封堵。假设在火灾中防火封堵保持完整，不出现开口或脱落等情况。

（2）无防火封堵。假设防火封堵在火灾中受损完全脱落，幕墙连接件完全暴露在火中。

模拟时，结合实际工程中幕墙连接位置的不同，在混凝土基体高度方向上设置3个不同位置的温度考察点，如图2所示，同时在防火封堵下方设置一个温度考察点[3]，以得到火灾下各点的温度情况。

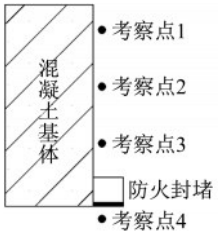


图2　温度考察点示意图

Fig.2　Schematic diagram of temperature inspection points

图3为模拟得到的各典型火灾场景下防火封堵处的温度曲线。由图3可知，各火灾场景下防火封堵处的温度均达到600 ℃以上，最高达到800 ℃以上。防火封堵主要由镀锌钢板和岩棉组成，镀锌钢板在超过600 ℃的高温下强度会大幅下降，可能会失去承托能力，使得防火封堵脱落，同时该温度下岩棉也会收缩变形甚至碳化，基本丧失强度和阻火作用。因此，在实际火灾中，防火封堵确实有脱落的危险，工况(2)的设置是合理的。

另外，模拟结果显示，行政办公室中各考察点的温度最高，故其是本文最危险的火灾场景。后

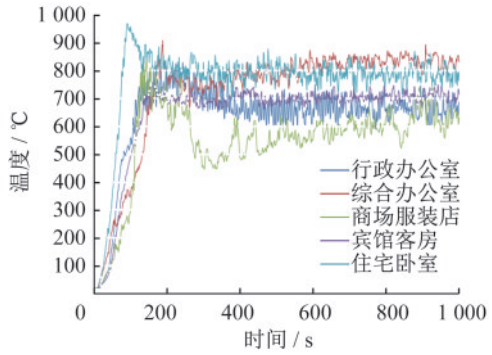


图3 五种火灾场景下防火封堵处的温度曲线

Fig.3 The temperature curves of fire stop under five fire scenarios

续的分析和计算均以行政办公室为例进行。

对于有防火封堵的工况，各火灾场景下模拟得到的考察点1—3的温度均始终保持为初始温度，这是因为在该工况中，防火封堵完好无损，其内部的连接件被很好地保护，故在火灾中未受到损伤。

对于防火封堵脱落（即无防火封堵）的工况，行政办公室火灾场景模拟得到的考察点1—3的温度曲线如图4所示。由图4可知，各考察点温度的发展趋势是相同的，但随着考察点位置的升高，其温度随之降低。这是因为混凝土基体对烟气有一定的阻隔作用，导致热烟气不能充分上升，考察点位置越高，上升至该处的热烟气越少，所以其温度也越低。

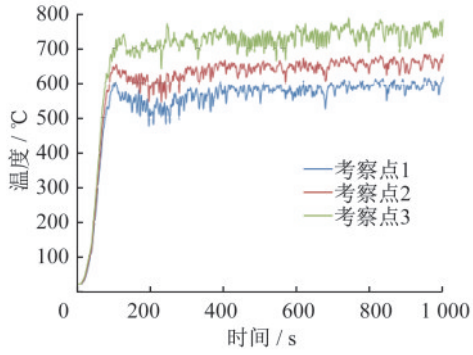


图4 行政办公室各考察点温度曲线

Fig.4 Temperature curves of each inspection point in the administrative office

2 幕墙连接件内部温度的有限元模拟分析

2.1 幕墙连接构造

幕墙连接的具体构造如图5所示。其中钢角码与幕墙立柱通过螺栓进行栓接，与主体结构通过埋件相连，如焊接固定于埋件的钢板上，埋件钢板再通过锚筋或化学螺栓和主体结构相连，或者与固定在主体结构内部的槽型埋件直接通过T型螺栓相连，从而完成幕墙和主体结构的连接。

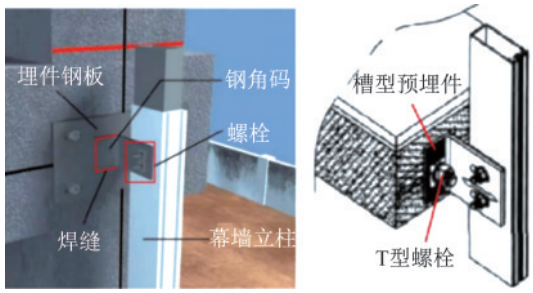


图5 幕墙连接示意图

Fig.5 Schematic diagram of curtain wall connection

2.2 有限元模拟分析

由图5可知，幕墙连接件中部分构件位于混凝土内部，所以也需对混凝土内部温度进行模拟。又因为连接件基本都由钢材制成，且各部分间的连接方式对模拟结果并无影响，所以建模时进行简化，仅对钢角码和混凝土梁进行建模。

要得到钢角码和混凝土的内部温度情况，需要在其内部设置温度考察点，本次模拟在钢角码的内部形心处设置一个温度考察点，在混凝土梁跨中截面上与钢角码同一高度处沿梁宽方向共设置4个温度考察点，从梁表面开始至梁宽的中心线处，依次命名为考察点1、2、3、4，如图6所示。

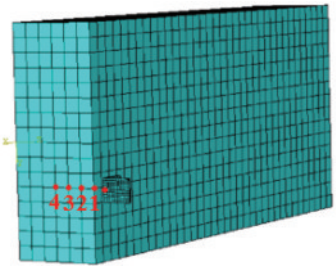


图6 温度考察点位置图

Fig.6 Location map of temperature inspection points

模拟得到各考察点的温度曲线如图7所示。

由图7可知，钢角码内部温度随时间推移会逐渐接近环境温度，最终其内部温度为745 ℃，而通过数值模拟得到该处的环境温度最终稳定在750 ℃，二者仅相差5 ℃，所以对幕墙连接件进行计算时，可以直接取环境温度作为连接件的内部温度。

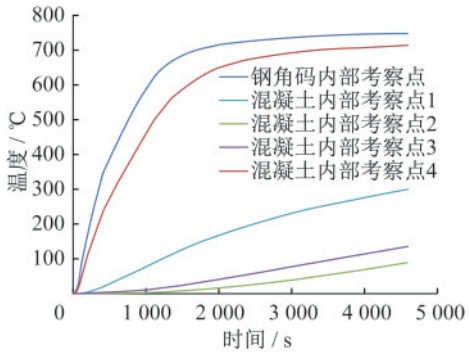


图7　各考察点温度曲线

Fig.7　Temperature curves of each inspection point

由混凝土内部4个温度考察点的温度曲线可知，混凝土表面的温度很高，这是因为它直接与高温热烟气接触，但由于混凝土是热惰性材料，导热性差，所以随着埋深的增加，其温度大幅度降低。

3　火灾下幕墙连接的承载力验算

根据有限元模拟结果，对于幕墙连接件与空气直接接触的部分，可取空气温度作为其内部温度，而对位于混凝土内部的部分，可取其周围混凝土温度作为内部温度。确定幕墙连接件内部温度后，考虑高温下材料强度的劣化，即根据温度对材料强度进行相应折减，再验算其承载能力。

3.1　钢角码

钢角码采用角钢，其靠近预埋件处的根部是最危险的截面，因其同时承受水平力（风荷载或水平地震作用）、竖向力（玻璃幕墙的自重）和竖向力产生的弯矩作用，具体的应力分布如图8所示。该截面上，A点和O点都是最危险的点，A点受拉应力和最大弯曲正应力共同作用，O点受拉应力和最大剪应力共同作用。

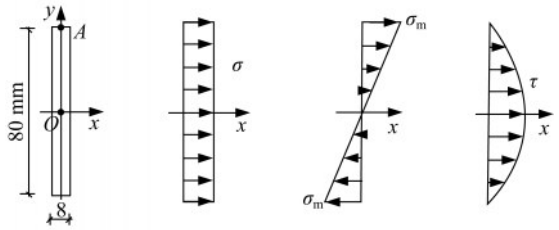


图8　角钢最危险截面应力分布图

Fig.8　Stress distribution diagram of the most dangerous section of angle steel

假设幕墙尺寸为1.8 m×3.6 m，每个幕墙连接处采用两个Q235钢角码，尺寸为100 mm×80 mm×8 mm，并假设竖向力的作用点在角钢伸出一侧距离O点75 mm处。按建筑的抗震设防烈度为7度（0.15g）、玻璃幕墙的重力荷载标准值为0.5 kN/m^{2}考虑，根据规范[12-13]及荷载作用效应组合，可计算得到钢角码所受荷载：水平荷载设计值V_h=19.03 kN；竖向荷载设计值V_v=3.89 kN；弯矩设计值M=0.29 kN·m。

进一步可计算得到钢角码所受应力：最大拉应力σ=14.68 MPa；最大剪应力τ=4.56 MPa；最大弯曲正应力σ_m=17.09 MPa。

常温下Q235钢材的强度设计值f=215 MPa，而高温下其强度设计值要乘以相应的折减系数[14]。

$$f_T=\eta_{sT}f \tag{5}$$

$$\eta_{sT}=\begin{cases}1.0 & 20\ ℃\leqslant T_s\leqslant 300\ ℃\\ 1.24\times10^{-8}T_s^3-2.096\times10^{-5}T_s^2+9.228\times10^{-3}T_s-0.216\ 8 & 300℃<T_s<800\ ℃\\ 0.5-T_s/2\ 000 & 800\ ℃\leqslant T_s\leqslant 1\ 000\ ℃\end{cases} \tag{6}$$

式中：f_T为高温下钢材的强度设计值；f为常温下钢材的强度设计值；η_{sT}为高温下钢材的屈服强度折减系数；T_s为钢材的内部温度。

以行政办公室中温度最高的测点3处的钢角码为例，其内部温度取空气温度，即T_s=750 ℃，可得f_T=30.88 MPa。

验算得

A点：$\sigma+\sigma_m$=31.95 MPa≥f_T

O点：$\sqrt{\sigma^2+3\tau^2}$=16.83MPa≤f_T

计算结果表明，O点仍能满足承载力要求，但A点的承载力已不满足要求。

3.2　螺栓

钢角码和幕墙立柱之间通过螺栓进行连接，一般采用不锈钢螺栓。对螺栓承载力的验算，主要从受剪承载力和局部承压承载力两方面进行。

现假设采用2个M12不锈钢连接螺栓，材质为A2-50。在规范[15]中可查得其常温下抗剪强度设计值f_v^b=175 MPa，局部承压强度设计值f_c^b=120 MPa。

对高温下不锈钢螺栓的承载力计算，本文采

用欧规[16]中不锈钢在温度升高时的屈服强度折减系数，查得750 ℃时其屈服强度折减系数为0.305。

每个钢角码和立柱的连接处采用两个螺栓，螺栓所受荷载同前，螺栓承载力的验算如下：

单个螺栓受力 $N_v=\frac{1}{2}\sqrt{V_h^2+V_v^2}=9.71$ kN。

$N_v^b=n_v\pi d f_v^b/4=12.07$ kN≥N_v，抗剪承载力满足要求。

$N_c^b=d\Sigma t f_c^b/4=3.07$ kN≤N_v，局部承压承载力不满足要求。

结果表明，火灾下螺栓的抗剪承载力仍能满足要求，但局部承压承载力已经远低于其所受的剪力。

3.3 埋件

埋件分为预埋件和后锚固件，预埋件主要有爪式预埋件和槽式预埋件，后锚固件通常为化学锚栓。

3.3.1 爪式预埋件

如图9所示，爪式预埋件由锚筋和锚板焊接组成，其承载力通过锚筋的总截面面积验算判定。

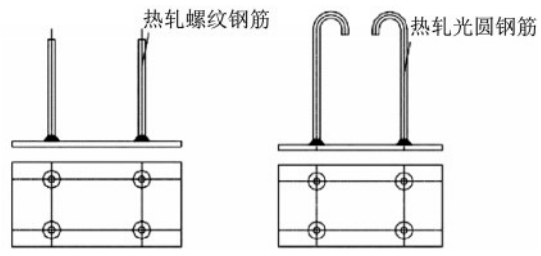


图9 爪式预埋件示意图

Fig.9 Schematic diagram of claw embedded parts

假设爪式预埋件采用500 mm×300 mm×6 mm的Q235锚板，在锚板四角对称配置4根ϕ8直锚筋，长度为110 mm，主体采用C30混凝土。

爪式预埋件承受的荷载同前，其锚筋的总截面面积A_s应满足以下公式：

$$A_s\geqslant\frac{V_v}{\alpha_r\alpha_v f_y}+\frac{V_h}{0.8\alpha_b f_y}+\frac{M}{1.3\alpha_r\alpha_b f_y z} \quad (7)$$

$$A_s\geqslant\frac{V_h}{0.8\alpha_b f_y}+\frac{M}{0.4\alpha_r\alpha_b f_y z} \quad (8)$$

$$\alpha_v=(4.0-0.08d)\sqrt{\frac{f_c}{f_y}} \quad (9)$$

$$\alpha_b=0.6+0.25t/d \quad (10)$$

式中：α_r为钢筋层数影响系数，当锚筋等间距配置时，二层取1.0，三层取0.9，四层取0.85；α_v为钢筋受剪承载力系数，当α_v大于0.7时，取α_v等于0.7；α_b为锚板弯曲变形折减系数，当采取防止锚板弯曲变形的措施时，可取α_b等于1.0；d为钢筋直径；t为锚板厚度；z为沿剪力作用方向最外层锚筋中心线之间的距离；f_c为混凝土轴心抗压强度设计值；f_y为钢筋抗拉强度设计值，不应大于300 N/mm^2。

常温下ϕ8直锚筋的抗拉强度设计值为300 MPa。火灾下，因锚筋置于混凝土中，其温度可取周围混凝土的温度。混凝土温度随埋深而改变，故本文沿埋深将锚筋分割成多个10 mm的小段，假设每段的内部温度相等，代入式(5)、式(6)计算，再取平均值f_y=256.83 MPa作为强度设计值。

由式(7)—式(10)计算得$A_{s1}=150.27$ mm^2，$A_{s2}=153.46$ mm^2，均小于$A_s=201.06$ mm^2，满足要求。

上述结果表明，爪式预埋件在本文最危险的火灾场景下，由于受到混凝土的保护，其在火灾中受到的影响较小，承载力能够满足要求。

3.3.2 槽式预埋件

槽式预埋件由锚筋和槽钢焊接而成，根据埋设位置的不同可分为侧埋式和顶埋式(如图10和图11所示)，验算时应对螺栓的抗拉承载力、抗剪承载力、埋件局部承压(螺栓孔壁)和锚筋的承载力进行计算[17]。

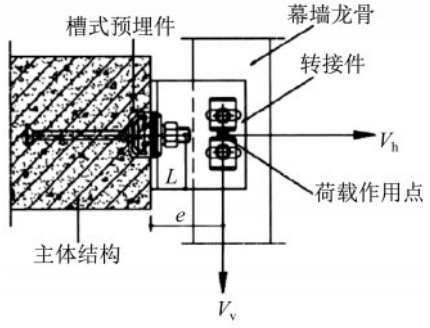


图10 侧埋式槽式预埋件布置形式及受力示意图

Fig.10 Layout and load-bearing diagram of side-embedded channel-type embedded rail

现假设槽式预埋件的T型螺栓采用2个8.8级的M12螺栓，其有效面积A=84.27 mm^2。一个埋件上设置3根锚筋，单根锚筋的截面积A_s=150 mm^2。

1) 侧埋式

侧埋式槽式预埋件的受力情况如图10所示，

其所受荷载同前。因此，槽式预埋件实际所受的拉力设计值 $F=V_h+M/L=26.28$ kN，剪力设计值 $V=V_v=3.89$ kN。

经计算，750 ℃时，T型螺栓的抗拉强度设计值 f_t^b=57.6MPa，抗剪强度设计值 f_v^b=46.08 MPa，埋件的抗压强度设计值 f_c=58.32MPa。

具体验算如下：

$f_{tb}=F/2A$=155.9 MPa≥f_t^b，螺栓拉应力不满足要求；$f_{vb}=V/2A$=23.1 MPa≤f_v^b，螺栓剪应力满足要求；$N_c=dtf_c$=5.6kN≥ $V/2$=1.94 kN，埋件局部承压（螺栓孔壁）承载力满足要求。

槽式预埋件的锚筋在高温下的强度设计值与爪式预埋件相同，其抗拉强度设计值 f_σ=109.01 MPa，抗剪强度设计值 f_τ=63.38 MPa。

再对单根锚筋的承载力进行验算：

$\sigma=F/3A_s$=58.4 MPa≤f_σ=109.01 MPa，拉应力满足要求；$\tau=V/3A_s$=8.64 MPa≤f_τ=63.38 MPa，剪应力满足要求。

2）顶埋式

顶埋式槽式预埋件所受荷载同前，其相对位置及受力情况如图 11 所示。其实际所受的拉力设计值为 $F=V_v(C-D)/D$=1.94 kN，剪力设计值为 $V=V_h$=19.03 kN。

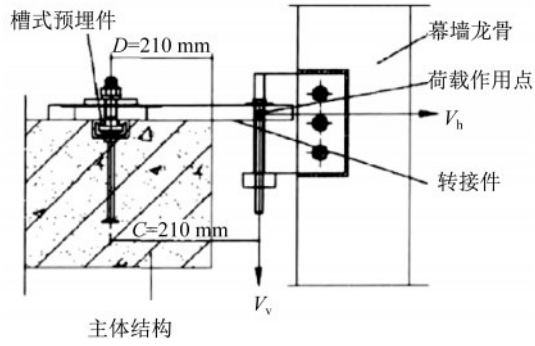


图 11　顶埋式槽式预埋件布置形式及受力示意图

Fig.11　Layout and load-bearing diagram of top-embedded channel-type embedded rail

顶埋式的验算同侧埋式，验算可得：T型螺栓的拉应力满足要求、剪应力不足；埋件局部承压承载力不足；锚筋的承载力均满足要求。

综上，在本文最危险火灾场景下，两种槽式预埋件中的锚筋承载力均满足要求；但侧埋式T型螺栓的拉应力不足，顶埋式T型螺栓的剪应力和埋件局部承压承载力不足。

3.3.3　化学锚栓

化学锚栓是在主体结构混凝土施工后再钻孔，并用锚固胶将螺杆固定于钻孔中的后锚固方式。对化学锚栓承载力验算，进行如下假设：在 500 mm×300 mm×10 mm 钢板的四角分别设置一根 M12 螺栓，螺杆为喜利得 HIT-V5.8 级螺杆，材质为 Q235，埋深为 110 mm。

该化学锚栓，其受力同爪式预埋件。化学锚栓的拉力验算公式为

$$N_{max}\leqslant N_{Rd} \tag{11}$$

式中：N_{max} 为群锚中拉力最大锚栓的拉力设计值，其具体计算方法详见规范[18]；N_{Rd} 为锚栓抗拉承载力。

化学锚栓的剪力验算公式如下：

$$V_s=V_v/n\leqslant V_{Rd} \tag{12}$$

式中：V_s 为群锚中剪力最大锚栓的剪力设计值；V_{Rd} 为锚栓抗剪承载力。

组合应力验算公式为

$$F_{Rd}=\left[\left(\frac{\cos\alpha}{N_{Rd}}\right)^{1.5}+\left(\frac{\sin\alpha}{V_{Rd}}\right)^{1.5}\right]^{-\frac{2}{3}}\geqslant\sqrt{N_{max}^2+V_s^2} \tag{13}$$

式中：α 为荷载夹角，$\alpha=\arctan\left(V_s/N_{max}\right)$。

根据以上公式对化学锚栓所受内力进行计算，可得 $N_{max}=5.24$ kN，$V_s=0.97$ kN，$\alpha=10.5°$。

在喜得利紧固技术手册[19]中查得，本文化学锚栓常温下的抗拉承载力设计值为 25.4kN，抗剪承载力设计值为 18.3 kN。750 ℃时钢材的屈服强度折减系数为 0.144，所以此时化学锚栓的抗拉承载力设计值 $N_{Rd}=3.51$ kN，抗剪承载力设计值 $V_{Rd}=2.64$ kN。

因此根据式（11）—式（13）可验算得到，化学锚栓的抗剪承载力仍满足要求，但抗拉和组合承载力都不再满足要求。

3.4　焊缝

钢角码和预埋件间采用三边围焊连接，焊缝的受力示意如图 12 所示。根据 3.1 节，钢角码尺寸为 100 mm×80 mm×8 mm，假设焊脚尺寸 h_f=6 mm，可计算得焊缝弯矩 M_x=145.80 kN·mm，M_y=637.79 kN·mm，M_z=130.31 kN·mm。

图 12 中 A 点和 B 点为有效截面危险点，均受正应力和剪应力共同作用，计算得到 A、B 两点所受正应力、剪应力分别为 $\sigma_A=59.07$ MPa，$\tau_A=5.12$ MPa，$\sigma_B=35.4$ MPa，$\tau_B=6.71$ MPa。

对于角焊缝中 A、B 两点的验算公式如下：

$$\sqrt{\left(\sigma_f/\beta_f\right)^2+\tau_f{}^2}\leqslant f_f^w \tag{14}$$

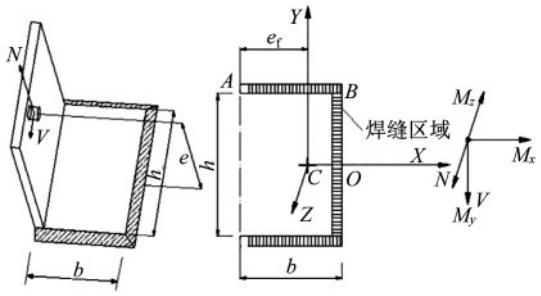


图12 焊缝受力示意图

Fig.12 Schematic diagram of the force of the weld

式中：σ_f为垂直于焊缝长度方向的正应力；τ_f为沿焊缝长度方向的剪应力；f_f^w为角焊缝的强度设计值；β_f为正面角焊缝的强度设计值增大系数，对于幕墙结构，取1.22。

角焊缝采用E43型手工焊条，查规范可知，其强度设计值为160 MPa。本文采用乔文娟[20]试验研究得到的屈服强度折减系数对焊缝高温下承载力进行验算，750 ℃时，焊缝的屈服强度折减系数为0.15，故其强度设计值f_f^w=24.24 MPa。

根据式(14)进行验算可得，A、B两点处的承载力均无法再满足设计要求。

4 建筑幕墙连接的防火对策

通过上述一系列模拟和计算分析可知，防火封堵在火灾中确实存在脱落风险；在防火封堵脱落的情况下，玻璃幕墙连接的承载力无法再满足要求，玻璃幕墙与主体结构间的连接不再可靠，可能导致幕墙发生整体脱落，所以玻璃幕墙的抗火性能较差。

为提高建筑玻璃幕墙连接的抗火性能，确保火灾下整体幕墙的安全，根据前文计算分析，可从以下几个方面采取措施。

4.1 防火封堵

模拟结果表明，防火封堵(由镀锌钢板和岩棉组成)在火灾中可能发生脱落，丧失封堵作用。所以可以考虑使用耐火性能更强的材料制成防火封堵，以加强防火封堵的抗火性能。

4.2 幕墙连接位置

根据模拟结果，随着幕墙连接位置高度的增加，其温度随之降低。故若要提高幕墙连接的抗火性能，应尽量将幕墙连接点设置在较高位置处，例如在幕墙连接方式中，顶埋式连接相较于侧埋式更好。

4.3 防火保护层

对玻璃幕墙连接件，通常仅设置防火封堵这一道防火保护，一旦防火封堵失效，其在火灾中的承载力会大幅下降。故要提高幕墙连接的抗火性能，可再在其表面设置防火保护层(如防火砂浆或超薄型防火涂料)，使其耐火极限不低于1.0 h。

4.4 幕墙连接

针对幕墙连接件本身，可适当增加幕墙连接点的数量或适当增大钢角码的尺寸，选用高强度螺杆或更大直径的螺杆，以提高幕墙连接承载能力的冗余度；另外，在三种形式的埋件中，应尽量选择抗火性能最好的爪式预埋件。

4.5 幕墙面板

对于玻璃幕墙本身，可以采用抗火性能更好的面板材料和胶体材料等。

5 结 论

本文在对建筑外围护结构进行总结分析基础上，选取目前火灾危险性最大的玻璃幕墙，以幕墙与主体结构间的连接为研究对象，对其抗火性能展开了一系列模拟分析。主要结论如下：

(1) 目前工程上常用的幕墙连接件的防火封堵(镀锌钢板+岩棉)在火灾中有脱落或失去阻火作用的危险。

(2) 火灾中，玻璃幕墙连接中的钢角码、螺栓、焊缝等外露连接件以及化学锚栓的承载力不足，而预埋件(爪式、槽式)的承载力基本能满足要求。

(3) 幕墙结构与主体结构间的连接位置越高，其火灾时的温度相对越低，因此建议工程中尽量采用顶埋式连接。

(4) 建议在工程中提高防火封堵的耐火性能，或在目前防火封堵基础上再增加连接件的防火保护层，或适当提高连接件承载力的冗余度，以满足火灾中的连接结构的耐火性能。

参 考 文 献

[1] 田玮.玻璃幕墙的连接计算[J].山西建筑,2006(1):95-96.
Tian Wei.Connection calculation of glass curtain walls [J].Shanxi Architecture,2006(1):95-96.(in Chinese)

[2] 林锋,韩莹.建筑幕墙防火分析[J].工程建设与设计,2017(11):31-33,36.
Lin Feng, Han Ying. Fire protection analysis of building curtain walls [J]. Engineering Construction and Design,2017(11):31-33,36.(in Chinese)

[3] 张慧勤.建筑幕墙结构的抗火性能研究[D].上海:同济大学,2021.
Zhang Huiqin. Researches on the fire resistance of building curtain wall structures [D]. Shanghai: Tongji University,2021.

[4] 王能胜.基于火灾荷载的高层建筑性能化设计研究[D].重庆:重庆大学,2013.
Wang Nengsheng. Research on performance-based design of high-rise buildings based on fire load [D]. Chongqing:Chongqing University,2013.(in Chinese)

[5] 王金平,朱江,刘红涛,等.北京地区住宅中活动式火灾荷载的调查分析及标准值的确定[J].建筑科学,2010,26(1):24-27.
Wang Jinping, Zhu Jiang, Liu Hongtao, et al. Investigation and analysis of movable fire load in residential buildings in Beijing area and determination of standard values[J].Building Science,2010,26(1):24-27.(in Chinese)

[6] 李天,张猛,薛亚辉.中原地区住宅卧室活动火灾荷载调查与统计分析[J].自然灾害学报,2010,19(4):124-128.
Li Tian, Zhang Meng, Xue Yahui. Investigation and statistical analysis of movable fire load in residential bedrooms in Central Plains area[J].Journal of Natural Disasters,2010,19(4):124-128.(in Chinese)

[7] 王志刚,倪兆鹏,王宗存,等.设计火灾时火灾热释放速率曲线的确定[J].安全与环境学报,2004,4(S1):50-54.
Wang Zhigang, Ni Zhaopeng, Wang Zongcun, et al. Determination of heat release rate curve of fire in design fire scenario [J]. Journal of Safety and Environment,2004,4(S1):50-54.(in Chinese)

[8] 柴盼.高层建筑火灾场景设置研究[D].重庆:重庆大学,2014.
Chai Pan.Research on fire scenario setting in high-rise buildings[D].Chongqing:Chongqing University,2014.(in Chinese)

[9] 田玉敏.论“性能化”防火设计中的“设计火灾场景”[J].火灾科学,2003,12(1):29-35.
Tian Yumin. Discussion on design fire scenarios in performance-based fire protection design [J]. Fire Safety Science,2003,12(1):29-35.(in Chinese)

[10] 王卫东,朱春玲,王新红,等.利用有效燃烧热对轰燃条件的计算[J].消防技术与产品信息,2012(S1):118-121.
Wang Weidong, Zhu Chunling, Wang Xinhong, et al. Calculation of flashover conditions using effective heat of combustion [J]. Fire Technique and Products Information,2012(S1):118-121.(in Chinese)

[11] 肖梦睫,汪金辉,刘江虹.高校学生宿舍火灾热释放速率特性研究[J].安全,2015,36(3):12-14,19.
Xiao Mengjie, Wang Jinhui, Liu Jianghong. Study on characteristics of heat release rate of fire in college student dormitory[J].Safety & Security,2015,36(3):12-14,19.(in Chinese)

[12] JGJ 102—2003 玻璃幕墙工程技术规范[S].
JGJ 102—2003 Technical code for glass curtain wall engineering[S].(in Chinese)

[13] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009—2012 Load code for the design of building structures[S].(in Chinese)

[14] GB 51249—2017 建筑钢结构防火技术规范[S].
GB 51249—2017 Standard for fire safety of steel structures in buildings[S].(in Chinese)

[15] GB 50017—2017 钢结构设计规范[S].
GB 50017—2017 Standard for design of steel structures[S].(in Chinese)

[16] Eurocode 3:design of steel structures,part 1-2:general rules-structural fire design[S].

[17] 叶磊,黄斌.幕墙槽式埋件的设计探讨[J].福建建筑,2012(5):89-90.
Ye Lei,Huang Bin.Discussion on the design of channel type embedded parts for curtain walls [J]. Fujian Architecture & Construction, 2012 (5) : 89-90. (in Chinese)

[18] JGJ 145—2013 混凝土结构后锚固技术规程[S].
JGJ 145—2013 Technical specification for post-installed fastenings in concrete structures [S]. (in Chinese)

[19] HILTI Corporation. HILTI direct fastening technology manual:08/2024[R]. Schaan: Hilti Corporation,2024.

[20] 乔文娟.钢结构焊缝高温力学性能研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
Qiao Wenjuan. Study on high-temperature mechanical properties of steel structural welds[D].Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese)