引用格式：蒋坤，薛伟辰，李志杰，等. 配纤维增强复合材料(FRP)连接件的预制夹心保温外挂墙板抗火性能[J]. 工业建筑，2026，56(2)：88-98. JIANG Kun，XUE Weichen，LI Zhijie，et al. Fire Resistance of Precast Concrete Sandwich Cladding Panels with FRP Connectors[J]. Industrial Construction，2026，56(2)：88-98 (in Chinese). DOI：10.3724/j.gyjzG26012901

配纤维增强复合材料(FRP)连接件的预制夹心保温外挂墙板抗火性能*

蒋　坤[1]　薛伟辰[1]　李志杰[1]　李　亚[2]

(1. 同济大学土木工程学院，上海　200092；2. 上海师范大学建筑工程学院，上海　201418)

摘　要　为了研究无机保温砂浆层对配纤维增强复合材料(FRP)连接件预制混凝土夹心保温墙板抗火性能的影响，通过考虑高温对混凝土、钢筋、FRP材料的影响，在有限元分析软件ABAQUS中建立温度-位移场耦合分析模型，开展标准火灾有限元分析，并与2片配FRP连接件的预制混凝土夹心保温墙板耐火试验结果进行对比，验证了模型的有效性，并进一步开展参数分析，研究了有无平面外荷载和受火时间对墙板抗火性能的影响。研究表明：保温砂浆层可提升预制混凝土夹心保温外挂墙板(PSCP)的热阻能力、抗弯刚度，降低墙板内部的热对流；FRP连接件在受火60 min内轻微损伤，达到玻璃化温度后仍能提供抗剪刚度，所以玻璃化温度对于判断墙板发生连接件破坏是偏保守的温度；增加平面外荷载使墙板挠度变大，但对温度场无明显影响；受火180 min可能将导致FRP连接件丧失与混凝土板的黏结锚固能力。

关键词　预制混凝土夹心保温外挂墙板；无机保温砂浆；FRP连接件；温度-位移场耦合有限元分析；标准火灾

Fire Resistance of Precast Concrete Sandwich Cladding Panels with FRP Connectors

JIANG Kun[1]　XUE Weichen[1]　LI Zhijie[1]　LI Ya[2]

(1. *College of Civil Engineering*, *Tongji University*, *Shanghai* 200092, *China*; 2. *School of Civil Engineering*, *Shanghai Normal University*, *Shanghai* 201418, *China*)

Abstract: To investigate the influence of the inorganic insulation mortar layer on the fire resistance of precast concrete sandwich panels (PCSPs) with fiber-reinforced polymer (FRP) connectors, a coupled temperature-displacement finite element model was developed using the finite element software ABAQUS by considering the effects of high temperature on concrete, rebars, and FRP materials. Finite element analyses were conducted under standard fire conditions, and the results were validated against fire resistance tests on two PCSPs with FRP connectors. Subsequently, parametric analyses were performed to examine the effects of out-of-plane loading and fire exposure duration. The results showed that the inorganic mortar increased thermal resistance and flexural stiffness but reduced heat convection within the panel. The FRP connectors were slightly damaged while still capable of providing shear capacity, and the glass transition temperature was found to be a conservative indicator of their failure. Although out-of-plane loading led to larger panel deflections, it had no appreciable effect on the temperature distribution. Compared to the 60-minute fire exposure, the FRP connectors were more prone to anchorage failure after 180 minutes of fire exposure.

*“十四五”国家重点研发计划(2022YFC3801400)。

第一作者：蒋坤，博士研究生，主要从事预制混凝土结构方向研究，jiangk0818@tongji.edu.cn。

通信作者：薛伟辰，博士，教授，博士生导师，主要从事预制混凝土结构、预应力混凝土结构及FRP筋混凝土结构等方面的研究，xuewc@tongji.edu.cn。

收稿日期：2026-01-29

Keywords: precast concrete sandwich cladding panels; inorganic insulation mortar; FRP connector; coupled temperature-displacement finite element analysis; standard fire

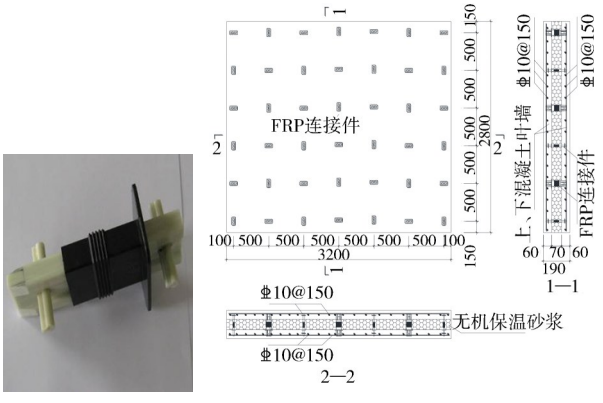
近年来，国家持续大力发展超低能耗建筑，与外保温墙体体系相比，预制混凝土夹心保温墙体的保温材料位于墙体内部，与外界空气隔绝，在建筑发生火灾时可避免火焰对墙体保温层的直接作用。同时，采用导热系数低、强度高、耐腐蚀的纤维增强复合材料（FRP）连接件，连接内外叶墙板和保温层材料，既能满足墙板安全受力的要求，又不影响夹心保温墙板的保温隔热优势，且耐久性良好。因此配 FRP 连接件的预制夹心保温墙体被认为是适用于超低能耗建筑的重要围护构件，应用前景广阔[1]。

但相较于钢筋、混凝土等材料，FRP 连接件在火灾高温的作用下，树脂基体会融化、分解，纤维丝会软化等，更容易发生力学性能的劣化，导致无法连接内外叶墙板，或者失去抗剪作用等，因此 FRP 连接件也会给墙体的抗火安全性能带来影响。朱筱俊等[2]对 4 个由内外叶钢筋混凝土墙板、不同保温材料板[挤塑聚苯乙烯（XPS）/模塑聚苯乙烯（EPS）/岩棉]及钢套筒连接件组成的预制复合保温墙体试件进行水平火灾试验炉单面受火试验，发现岩棉的隔热效果最好，XPS 板熔化后收缩粘贴在背火面的墙板上，形成了一层隔热膜层，隔热性能优于 EPS 板。Hulin 等[3]对 7 片高强混凝土预制夹心保温墙板的竖向抗火性能试验采用了点式和网片钢连接件，墙板裂缝主要在连接件位置附近开展，通过应力分析发现，连接件由于限制了板的弯曲变形，产生了较大应力集中，因此建议将抗剪连接件锚固到加劲肋中。Chen 等[4]在建立混凝土夹心保温墙板竖向受火的理论数值模型上进行了参数分析，发现随着所采用的桁架 FRP 连接件直径的增大，承受荷载的预制混凝土夹心保温墙体的抗火性能逐步增大；当桁架 FRP 连接件的直径小于 10 mm 时，试件会发生结构性破坏。Huang 等[5]在预制地质聚合物混凝土夹心保温墙板的竖向受力抗火性能试验中对采用了玻璃纤维增强塑料（GFPR）片状连接件和六角筒状连接件的墙体试件进行对比，研究发现，两种连接件对墙体试件的温度场分布和轴向刚度基本没有影响，但采用六角筒状连接件火灾后轴向承载力稍高于采用片状的轴向承载力。由文献综述可知，以往学者研究的受火夹心保温墙体以钢连接件为主，或者更多关注于承受轴向荷载的剪力墙，而对采用 FRP 连接件的预制混凝土夹心保温外挂墙板抗火性能的研究非常有限，且研究方法主要采用的是火灾试验分析和温度场传热分析，温度-位移场耦合有限元分析较少。因此，有必要对配 FRP 连接件的预制混凝土夹心保温墙板的抗火性能进行研究，对提高预制混凝土夹心保温墙体的防火设计与安全，以及推广其在节能建筑或超低能耗建筑中的应用具有重要意义。

相较于温度场传热分析，热应力耦合的温度-位移场有限元分析除了可以预测关键部位的温度变化，还能够预测墙板的变形，以及可能出现的混凝土开裂、连接件损伤等，同时在传统温度场传热单一分析的基础上，需要进一步考虑高温对材料力学性能退化和热膨胀变形的影响。为了研究无机保温砂浆层对预制混凝土夹心保温墙板抗火性能的影响，本文开展了预制混凝土夹心保温墙板的温度-位移场耦合分析，并通过 2 片墙板标准火灾试验结果验证了模型的有效性，由此进一步开展参数分析，研究平面外荷载和受火时间对墙板抗火性能的影响。

1　有限元模型建立

本文工程原型是平面尺寸为 2800 mm×3200 mm 配备 FRP 片状连接件的足尺预制混凝土夹心保温外挂墙板（图 1）。为建模与试验方便，设计墙板尺寸为 2800 mm×1600 mm×190 mm。其中 FRP 片状连接件尺寸采用纵横交错布置，间距为 500 mm×500 mm，锚固长度为 35 mm，保护层厚度为 25 mm。混凝土强度等



（a）片状 FRP 连接件　　（b）墙板工程原型

图 1　采用的 FRP 连接件及墙板工程原型　mm

Fig. 1　FRP connector and the engineering prototype of the panel

级为C35，内、外叶墙的混凝土墙体配置单层双向配筋⌀10@150，钢筋的混凝土保护层厚度为25 mm。采用的无机保温砂浆属于A级不燃材料，导热系数较低，为0.07~0.12 W/(m·K)。

1.1　材料高温热工性质及力学性能

对墙板进行标准火灾作用下的温度-位移场耦合分析时，需要在模型中考虑墙板各组成部分材料的热工性质及力学性能随温度变化的规律，作为输入参数代入模型中。

1.1.1　混凝土

混凝土的导热系数、比热容、密度随温度变化规律采用EN 1992-1-2[6]（图2）给出的建议取值，计算式为：

$$\lambda_c(T) = 2 - 0.2451(T/100) + 0.0107(T/100)^2 \quad (1a)$$

$$C_c(T) = \begin{cases} 900 & 20\ ℃ < T \leqslant 100\ ℃ \\ 900 + (T - 100) & 100\ ℃ < T \leqslant 200\ ℃ \\ 1000 + (T - 200)/2 & 200\ ℃ < T \leqslant 400\ ℃ \\ 1100 & 400\ ℃ < T \leqslant 1200\ ℃ \end{cases} \quad (1b)$$

$$\rho_T = \begin{cases} \rho_{20℃} & 20\ ℃ \leqslant T \leqslant 115\ ℃ \\ \rho_{20℃}[1 - 0.02(T - 115)/85] & 115\ ℃ < T \leqslant 200\ ℃ \\ \rho_{20℃}[0.98 - 0.03(T - 200)/200] & 200\ ℃ < T \leqslant 400\ ℃ \\ \rho_{20℃}[0.95 - 0.07(T - 400)/800] & 400\ ℃ < T \leqslant 1200\ ℃ \end{cases} \quad (1c)$$

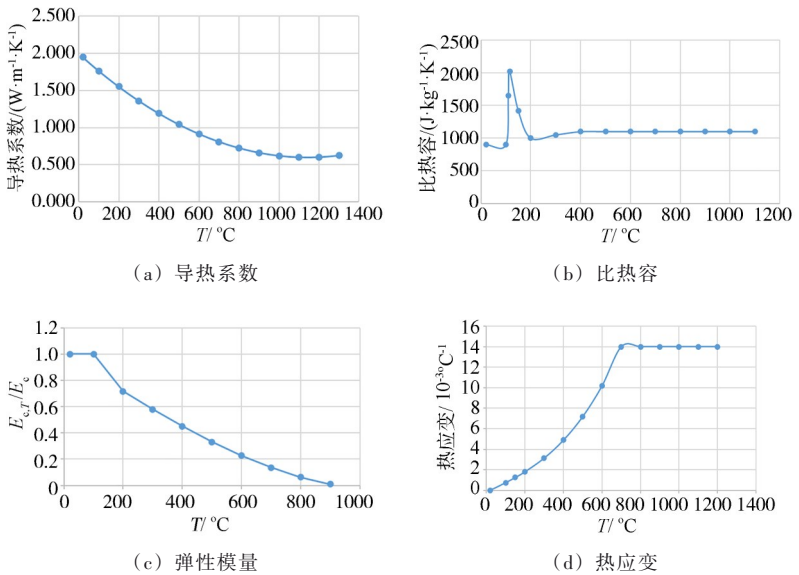
式中：λ_c、C_c、ρ_T分别为混凝土的导热系数、比热容、密度；T为温度。

EN 1992-1-2还基于混凝土的含水率对比热容进行了修正：100~115 ℃时线性增加，115 ℃时达到峰值，比热容值在115~200 ℃范围内线性下降，400 ℃后认为水分汽化迁移完全。修正值按混凝土含水率w=0~3%（质量百分比）对应的混凝土比热容值进行内插，具体取值如下：

$$C_{c,\mathrm{Peak}} = \begin{cases} 900 & w = 0\% \\ 1470 & w = 1.5\% \\ 2020 & w = 3\% \end{cases} \quad (2)$$

式中：$C_{c,\mathrm{Peak}}$为混凝土在115 ℃时的峰值比热容。

考虑到普通混凝土浇筑过程中含水量在2%~3%之间，本文按照w = 3%进行修正。



（a）导热系数　（b）比热容

（c）弹性模量　（d）热应变

图2　混凝土热工性质温度变化规律[6]

Fig. 2　Temperature-dependent thermal properties of concrete

混凝土弹性模量[图2(c)]随高温变化的规律由Aslani等[7]在总结前人数据的基础上通过回归分析给出：

$$E_{c,T} = \begin{cases} E_c & 20\ ℃ \leqslant T < 100\ ℃ \\ (1.015 - 0.00154T + 2 \times 10^{-7}T^2 + 3 \times 10^{-10}T^3) & 100\ ℃ < T \leqslant 1000\ ℃ \\ 0 & T > 1000\ ℃ \end{cases} \quad (3)$$

式中：$E_{c,T}$、E_c分别为高温下与常温下混凝土弹性模量。

混凝土热应变是指因为高温而发生的膨胀变形，EN 1992-1-2 对于硅质骨料的混凝土给出了热应变与温度的关系：

$$\varepsilon_c(T)=\begin{cases}-1.8\times10^{-4}+9\times10^{-6}T+2.3\times10^{-11}T^3 & 20\ ^\circ\mathrm{C}\leqslant T\leqslant 700\ ^\circ\mathrm{C}\\ 14\times10^{-3} & 700\ ^\circ\mathrm{C}<T\leqslant 1200\ ^\circ\mathrm{C}\end{cases}\tag{4}$$

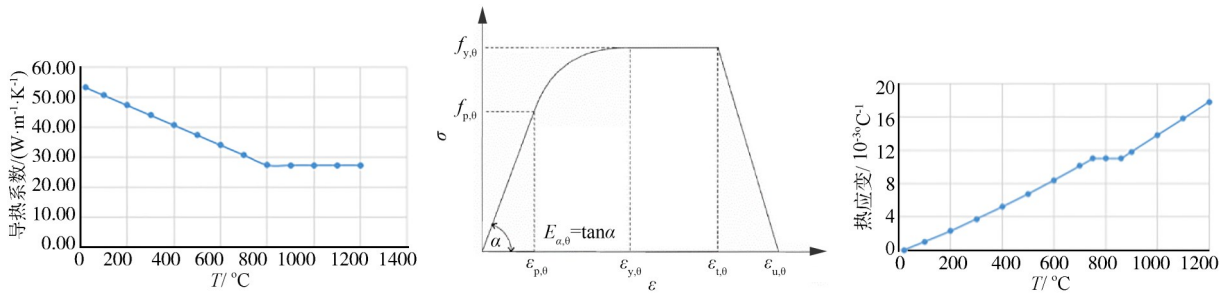
式中：$\varepsilon_c(T)$为混凝土热应变。

1.1.2　钢　筋

钢材的导热系数随温度的升高而递减，但当温度超过一定限值时，导热系数几乎变成了常数[8]，钢材的种类不同，导热系数也不完全一样，其中主要是受含碳量的影响，一般纯铁的导热系数值最大，随含碳和合金量的增多，导热系数逐渐减小，碳钢和低合金钢的导热系数都随温度的升高而减小，但变化率减慢。欧洲规范 Eurocode 3[9]对于钢筋的导热系数与温度给出了如图 3(a)所示的关系，计算式为：

$$\lambda_s=\begin{cases}54-3.33\times10^{-2}T & 20\ ^\circ\mathrm{C}\leqslant T<800\ ^\circ\mathrm{C}\\ 27.3 & 800\ ^\circ\mathrm{C}\leqslant T\leqslant 1200\ ^\circ\mathrm{C}\end{cases}\tag{5}$$

式中：λ_s为钢筋导热系数。



(a) 导热系数　(b) 应力-应变曲线　(c) 热应变

注：$\varepsilon_{p,\theta}$、$\varepsilon_{y,\theta}$分别为线弹性阶段强度、屈服强度对应的应变；$\varepsilon_{t,\theta}$为极限应变；$\varepsilon_{u,\theta}$为极限破坏时应变。

图 3　钢筋热工及力学性质随温度变化规律

Fig. 3　Temperature-dependent thermal and mechanical properties of rebars

比热容则参照日本《建筑物综合防火设计》[10]给出的关系：

$$C_s=483+8.02\times10^{-4}T_s^{\ 2}\tag{6}$$

式中：C_s为钢筋比热容。

钢筋的密度会随温度升高稍有下降，但变化较小，可近似取常温下的密度 7800 kg/m³。

对于高温下钢筋的应力-应变曲线，EN 1992-1-2 给出了如图 3(b)所示的简化本构模型，其中屈服应力$f_{y,\theta}$、线弹性阶段强度$f_{p,\theta}$、弹性模量$E_{a,\theta}$随温度变化的折减系数可查阅其中的 Table 3.1。钢筋的热应变[图 3(c)]也根据 EN 1992-1-2 给出的建议取值：

$$\varepsilon_s(T)=\begin{cases}-2.416\times10^{-4}+1.2\times10^{-5}T+0.4\times10^{-8}T^2 & 20\ ^\circ\mathrm{C}\leqslant T\leqslant 750\ ^\circ\mathrm{C}\\ 11\times10^{-3} & 750\ ^\circ\mathrm{C}<T\leqslant 860\ ^\circ\mathrm{C}\\ -6.2\times10^{-3}+2\times10^{-5}T & 860\ ^\circ\mathrm{C}<T\leqslant 1200\ ^\circ\mathrm{C}\end{cases}\tag{7}$$

式中：$\varepsilon_s(T)$为钢筋热应变。

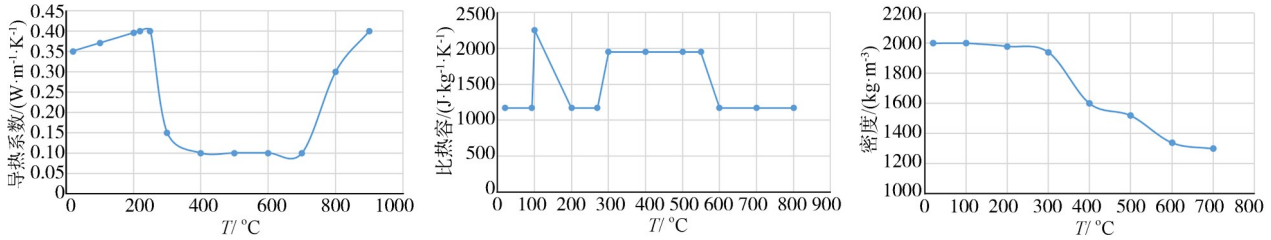
1.1.3　FRP连接件

FRP的导热系数依赖于树脂类型、纤维类型、方向以及纤维的体积比[11]。在常温下，GFRP 材料通过绝热量热法测量的导热系数为 0.35 W/(m·K)。在达到 250 ℃前，导热系数随温度线性增长，在 250 ℃后，树脂基体开始热降解，达到约 400 ℃的热降解温度后，玻璃纤维开始软化并且脱层，与仍保持完整的 GFRP 材料间形成空腔，产生辐射保护效应，因此导热系数急剧下降。随着温度升高，玻璃纤维断开并开始燃烧，新的受热面形成，因此导热系数又开始上升[图 4(a)]。

GFRP 材料通过绝热量热法实测的比热容为 1170 J/(kg·K)。随温度变化时主要考虑了 100 ℃时脱水、250 ℃左右树脂基体开始热分解的影响，在相应的温度区间比热容都会发生突变[图 4(b)]。

GFRP 材料在常温下的密度为 2000 kg/m³。随着温度的升高，水分蒸发及树脂组成材料逐渐分解，材料密度将减小。GFRP 的密度随温度变化规律[图 4(c)]可通过 TGA(热重分析)法测量质量-温度变化规律得到。

GFRP 材料的弹性模量在树脂软化前受温度的



（a）导热系数　　（b）比热容　　（c）密度

图 4　FRP材料热工性质随温度变化规律

Fig. 4　Temperature-dependent thermal properties of FRP materials

影响较小，一旦树脂完全软化，弹性模量随温度的升高迅速折减，接近线性变化，其随温度变化的折减系数参考了王晓璐等[12]的研究：

$$K_E=\begin{cases}1-\dfrac{T-T_0}{20\left(T_g-T_0\right)} & T_0\leqslant T<T_g\\ 0.95-\dfrac{T-T_g}{T_s} & T\geqslant T_g\end{cases}\tag{8}$$

式中：K_E为弹性模量折减系数；T_0、T_g、T_s分别为常温、树脂的玻璃化温度和纤维丝的软化温度。

GFRP材料热膨胀系数在纵向和横向并不相同，根据Zaidi等[13]研究，纵向热膨胀系数取为8.2×10^{-5} ℃$^{-1}$，横向热膨胀系数在0，30，60 ℃以上分别取为2.84×10^{-5}，3.12×10^{-5}，4.12×10^{-5} ℃$^{-1}$。

1.1.4　保温材料

原型墙板采用的无机保温砂浆由玻化微珠（轻质骨料）与保温胶粉料按照一定的比例搅拌混合而成，属于A级不燃材料且耐火，保温性能良好。无机保温砂浆高温表现稳定，故采用其常温下的热工性能指标[6]：导热系数为0.07～0.085 W/(m·K)，密度为300～350 kg/m^3，比热容为1050 J/(kg·K)。

1.2　关键问题处理

1.2.1　单元类型及尺寸的选择

上、下叶混凝土墙板，无机保温砂浆板和刚性垫块均采用八结点线性三维位移-温度耦合实体热分析单元C3D8T，以考虑其温度与位移场的耦合，单元大小为0.05 m。

FRP连接件在火灾中直接受力较小，主要考虑其温度变化和变形情况，故也采用八结点线性三维位移-温度耦合实体热分析单元C3D8T，单元大小为0.01 m。

纵筋和分布筋采用两结点桁架传热单元T3D2T，考虑其温度场和位移场的耦合，单元大小为0.1 m（图5）。

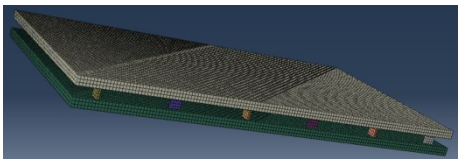


图 5　网格划分情况

Fig. 5　Meshing of the finite element model

1.2.2　相互作用

预制混凝土夹心保温墙体的下叶墙为受火面，高温炉气与下叶墙壁面间的强制对流换热系数α_c取25 W/(m^2·℃)。高温炉气向墙板受火面的辐射可视为两灰体组成的平行平面之间的辐射换热，辐射换热相当发射率ε_r取0.7。

预制混凝土夹心保温墙体的上叶墙为背火面，室温空气与上叶墙四周壁面的自然对流换热系数α_c取5 W/(m^2·℃)；墙板背火面与周围空间的辐射换热可视为墙板向半空间的辐射换热，辐射换热系数相当发射率ε_r取0.3。

在无保温层的墙板内，通过“接触（contact）”设置辐射换热与对流换热如图6中标红部分。由于夹心层空间狭小，在火灾中可近似为“黑箱”，即辐射换热相当发射率ε_r取1.0。除了辐射换热，夹心层空腔内还存在强烈的热对流，其对流换热系数α_c取20 W/(m^2·℃)。

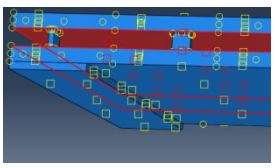


图 6　无保温层墙板在夹心层设置辐射、对流换热

Fig. 6　Radiation and convection heat transfer in the core layer of the wall panel without insulation layer

1.2.3　约束边界条件

上、下叶混凝土与钢筋网之间，以及与FRP连接件两端锚固部分采用嵌入（Embed）的约束方式。

钢垫板与下叶混凝土墙之间接触采用绑定(Tie)的约束方式。无机保温砂浆层与上、下混凝土板之间不设置约束。

两钢垫板底面中部采用铰支座的约束形式,与实际工程中两端线支承保持一致。

模型初始温度通过预定义场设置,可认为温度均匀分布,在初始步(initial)中定义模型升温开始前温度与室内环境温度相等,均取 20 ℃。

1.2.4　加载制度

温度荷载作用在模型的下表面,即受火面的位置,按照国际标准 ISO 834[14]设置标准火灾升温曲线,根据外挂墙板耐火极限要求[15]受火时间取 60 min,升温曲线计算式为:

$$T = 345\lg(8t + 1) + T_0 \tag{9}$$

式中:t 为受火时间;T_0 为初始环境温度。

2　有限元模型验证与分析

2.1　试验概况

为验证本文提出的有限元模型的有效性,开展了 2 片配 FRP 连接件的预制夹心保温外挂墙板的标准火灾试验,试件参数见表 1。

表 1　试件参数

Table 1　Parameters of specimens

试件	截面尺寸/mm			受火时间/min	保温层材料
	内叶墙	保温层	外叶墙		
W1	60	70	60	60	无机保温砂浆
W2	60	70	60	60	无

试验参照国家标准 GB/T 9978.1—2008《建筑构件耐火试验方法 第 1 部分 通用要求》[16]在同济大学抗火实验室水平构件火灾试验炉开展,如图 7 所示。试验中对试件的受火形态、承载能力、完整性、隔热性进行观测,测量墙板的跨中挠度,绘制混凝土沿厚度方向、FRP 中间和两端以及上下叶钢筋的温度时程曲线等,墙板受火后形态如图 8 所示。

2.2　温度响应

2.2.1　整体温度响应

预制混凝土夹心保温墙板 W1、W2 整体上均发生了朝受火面方向弯矩的热力弯曲(图 9)。由于连接件的作用,上、下叶墙的变形曲率基本一致。在温度场方面,下叶墙混凝土和钢筋的温度变化明显,由下至上温度递减。W1 无机保温砂浆保温层温度变化较小。而上叶墙混凝土和钢筋温度无明显变化,与试验中上叶墙的现象一致。对于 FRP 连接件,也是锚固在下叶墙混凝土内的部分温度变化明显。

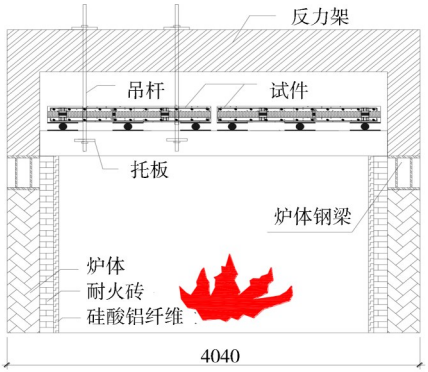


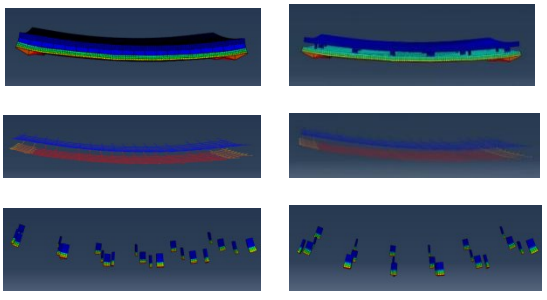
图 7　水平构件试验抗火试验　mm

Fig. 7　Fire resistance test of horizontal components



图 8　墙板受火后形态

Fig. 8　Post-fire appearances of the wall panels



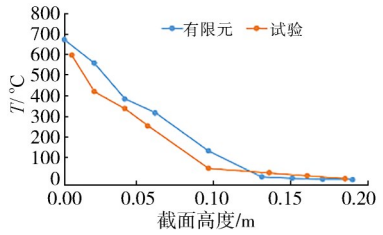
(a) W1　　(b) W2

图 9　试件整体温度响应

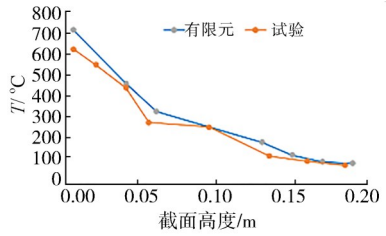
Fig. 9　Overall temperature responses of specimens

试件 W1 与 W2 相比,无机砂浆保温层的存在并没有使上叶墙的温度场分布产生明显差异,温度热量的传递在夹心层内已经发生骤降,可见无机砂浆保温层与空腔隔热效果无明显差异。在无机保温砂浆层布置连接件的位置观察到了明显高于其他位置的温度,连接件成为了“热桥”。但是由于 FRP 材料本身导热系数较低,均没有对上叶墙产生明显影响。

受火 60 min 时,从板底沿墙体截面厚度方向的温度场曲线如图 10 所示。可见:试件 W1 截面温度



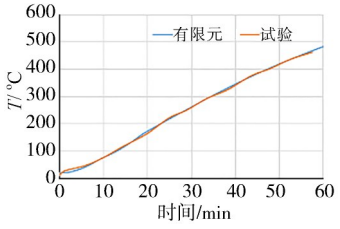
（a）W1



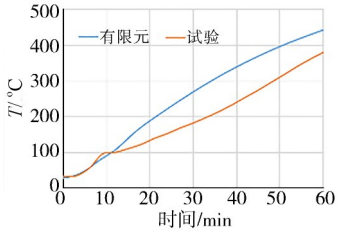
（b）W2

图 10　从板底沿墙体截面厚度方向的温度分布（受火 60 min）

Fig. 10　Temperature distribution along the wall thickness from the panel bottom (60 min fire exposure)



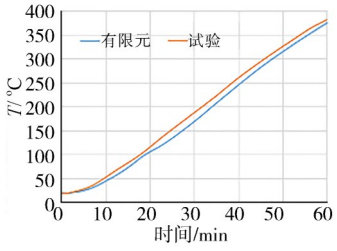
（a）W1



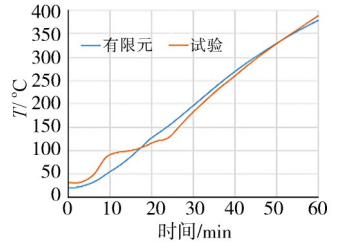
（b）W2

图 11　试件下叶墙内钢筋温度-时间曲线

Fig. 11　Temperature-time curves of rebars in the lower wythe of specimens



（a）W1



（b）W2

图 12　试件 FRP 连接件下部温度-时间曲线

Fig. 12　Temperature-time curves at the bottom of FRP connectors

场与试验结果开始时相差约 18.3%，而后逐渐接近至 10.7%，在上叶墙位置趋于平稳；W2 截面温度场与试验结果开始时相差 21%，而后温差逐渐缩小。分析其原因，试验中试件周围散热空间较大，且不带保温层试件的空间散热较快，导致前期温度稍有差距。

试件 W1 与 W2 相比，W1 受火面（下叶墙）温度比 W2 更高，但非受火面（上叶墙）的温度比 W2 更低，说明无机保温砂浆层的存在有效阻碍了温度在夹心保温层向上叶墙的传递。

2.2.2　局部温度响应

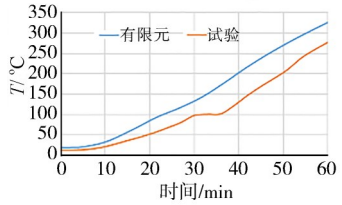
下叶墙内测点位置（距板端 1000 mm）钢筋温度响应如图 11 所示。可见：试件 W1 下叶墙钢筋有限元分析结果与试验吻合程度高，试件 W2 下叶墙钢筋有限元分析结果与试验前 15 min 较吻合，15 min 后相差约 15%，可能的原因是空腔的存在导致在试验中加快了墙体与外界空气的对流换热，钢筋温度稍有下降。

试件 W1 与 W2 相比，由于无机砂浆保温层的存在，阻止了下叶墙与空气的对流换热，因此 W1 的下叶墙钢筋温度更高（高 20.8%）。

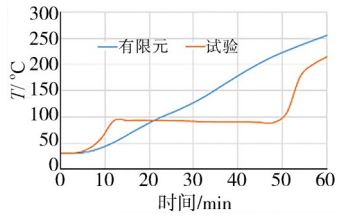
FRP 连接件（下部测点）温度响应如图 12 所示。试件 W1、W2 的 FRP 连接件温度有限元分析结果与试验吻合好，这是因为 FRP 材料的导热系数低，其通过热对流与热辐射损失的热量较少。

试件 W1 与 W2 相比，连接件下部的温度变化基本一致，说明无机砂浆保温层基本不影响锚固在混凝土中的 FRP 连接件的温度传递。

下叶墙混凝土测点的温度响应如图 13 所示。可见：试件 W1、W2 下叶墙混凝土温度有限元分析结果与试验相差分别约 22% 和 24.3%，且试验中混凝土升温曲线在 100 ℃时存在升温平台（W2 尤其明显），说明有限元分析中仅根据规范[6]中混凝土受含水率的影响修正比热容取值，并不能完全模拟出混凝土升温，100 ℃升温平台的模拟还需做进一步



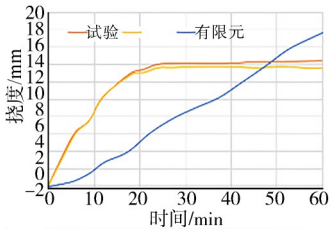
（a）W1



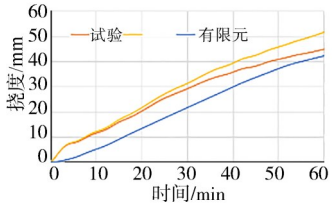
（b）W2

图 13　下叶墙混凝土温度-时间曲线

Fig. 13　Temperature-time curves of concrete in the lower wythe of specimens



（a）W1



（b）W2

图 14　试件跨中挠度-时间曲线

Fig. 14　Mid-span deflection-time curves of specimens

研究。

试件 W1 与 W2 相比，W1 的下叶墙混凝土升温更高（高 23.2%），这是由于无机砂浆保温层的存在，延缓了下叶墙的升温，并阻碍了下叶墙混凝土与空腔内空气的对流换热。

2.3　变形响应

试件跨中挠度-时间曲线如图 14 所示。试件 W1 跨中挠度变化有限元分析结果在前期比试验结果增长的速率慢，在后期挠度比试验结果增长的速率快。分析其原因：试验中试件开始受火后 FRP 连接件刚度退化，墙板受自重和热致弯曲影响填补空隙导致挠度增长较快，而 20 min 后由于无机砂浆保温层的存在，挠度增长减缓。而有限元分析中忽略了无机保温砂浆层与混凝土墙板间的空隙和界面退化，导致挠度持续缓慢增加。

试件 W2 跨中挠度变化的有限元分析结果与试验结果相比，挠度随时间缓慢增加的变化趋于一致，总体相差约 2%~11%。分析其原因：没有无机砂浆保温层的存在使整个墙板保持缓慢变形，墙板初始缺陷和材料间的缝隙使前几分钟受火挠度增加较快。而有限元分析中，忽略了材料的初始缺陷与材料间的缝隙，跨中挠度在开始时很小。

试件 W1 与 W2 相比，试件 W1 的跨中挠度更小（小 66%），且 W1 上下叶墙变形基本保持一致，这是由于无机保温砂浆层在受火过程中始终保留完好，为试件 W1 提供了较强的抗弯刚度和组合受力。

2.4　耐火极限性能判定

依据 GB/T 9978.1—2008 的要求对墙板在受火时间（60 min）内的承载能力、隔热性、完整性进行研究。

2.4.1　承载能力

试件在标准火灾下的变形量和变形速率是判定承载能力的主要参数，这是因为大变形下，结构的承载能力无法保证。水平受弯构件在火灾下的极限挠曲变形量 D 和极限挠曲变形速率限值的计算式为：

$$D = \frac{L^2}{400d} \tag{10a}$$

$$\frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}t} = \frac{L^2}{9000d} \tag{10b}$$

式中：L 为试件的净跨度；d 为试件截面上抗压点与抗拉点之间的距离；t 为受火时间。

由表 2 可知，试件 W1 与 W2 在受火过程中跨中挠度变形较小，且小于 $L/30$，不足以利用变形速率进行承载能力判定，即所有试件满足承载能力的要求。

2.4.2　完整性

试件发生以下任一限定情况均认为试件丧失完整性：1）依据规范[16]第 8.4.1 条进行试验，棉垫被点燃；2）依据规范[16]第 8.4.2 条的规定，缝隙探棒可以穿过；3）背火面出现火焰并持续时间超过 10 s。

根据试验现象及有限元分析结果（图 9）可知，在受火时间内所有试件完整性良好。

表 2　承载能力判定

Table 2　Criteria for bearing capacity

试件	跨中挠度变形/mm			变形速率/(mm·min^{-1})		
	限值 D	试验值	有限元值	限值 $\mathrm{d}D/\mathrm{d}t$	试验值	有限元值
W1	84.7	14	15	3.7	—	—
W2	84.7	48	42.5	3.7	—	—

注：试件变形在达到稳定阶段后将会发生相对快速的变形速率，因此依据变形速率的判定应在变形量超过 $L/30$ 之后应用。

2.4.3　隔热性

试件背火面温度温升发生超过以下任一限定的情况均认为试件丧失隔热性：1）平均温度温升超过初始平均温度 140 ℃；2）任一点位置的温度温升超过初始温度（包括移动热电偶），此处初始温度应是试验开始时背火面的温度，为 180 ℃。

由表 3 可知，背火面温度温升较小，均远小于 140 ℃，所以在受火时间内所有试件隔热性良好。

表 3　隔热性判定

Table 3　Criteria for thermal insulation　℃

试件	背火面平均温升		背火面单点最大温升	
	试验值	有限元值	试验值	有限元值
W1	10.5	15	11	16.2
W2	24.0	40	26	43.0

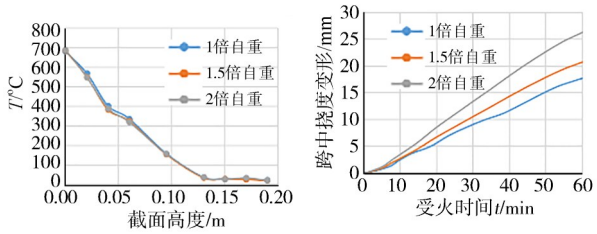
由以上承载能力、完整性、隔热性的判断可知，所有试件均满足 1 h 耐火极限的要求。同时由前文可知，所有 FRP 连接件的温度均远超过了 100 ℃左右的玻璃化温度（图 12），而所有试件的耐火性能均能满足要求，说明 FRP 连接件达到玻璃化后仍能提供抗剪刚度，玻璃化温度对判断墙板发生连接件破坏是偏保守的温度。

3　参数分析

3.1　平面外荷载的影响

不同平面外荷载下截面温度场如图 15（a）所示。可见，在不同平面外荷载作用下，墙体温度沿截面的分布基本没有变化，所以在研究的平面外荷载（1.0，1.5，2.0 倍墙板自重）范围内，平面外荷载对于墙体温度场的分布基本没有影响。

不同平面外荷载下跨中挠度-时间曲线如图 15（b）所示。可见：随着面外荷载的增加，试件在板底高温和平面外荷载的共同作用下，跨中挠度在相同受火时间下的挠度也会更大，说明面外荷载会对构



（a）截面温度场　　（b）跨中挠度-时间曲线

图 15　不同平面外荷载的影响

Fig. 15　Influence of out-of-plane load

件的变形能力产生影响，面外荷载越大，试件的平面外变形速率也会更大。因此在允许的变形能力范围之内，且不让试件产生承载力破坏，承受一定面外荷载是允许的。

3.2　受火时间的影响

分别考虑了受火 60，180 min 对墙板抗火性能的影响。在 ISO 标准火灾曲线中，受火 60 min 时炉温约 945 ℃，受火 180 min 时炉温约达到 1109 ℃，不同受火时间的温度差异将对墙板的抗火性能带来影响。

1）截面温度场。

不同受火时间时混凝土截面的温度场分布如图 16 所示。可知，受火 180 min 的墙板在下叶墙（0~0.06 m）高度范围内的温度明显高于受火 60 min 的墙板，而在保温层（0.06 ~0.13 m）时温度差异较小，在上叶墙（0.13 ~0.19 m）温度分布基本一致，基本呈现了从板底到板顶温度差异逐渐缩小的规律。所以受火时间长短主要影响下叶墙的温度分布。

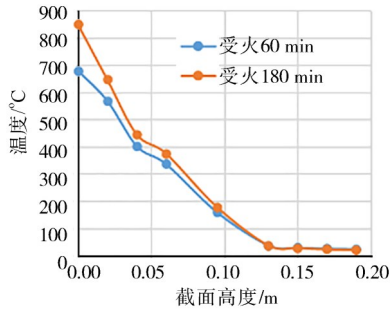


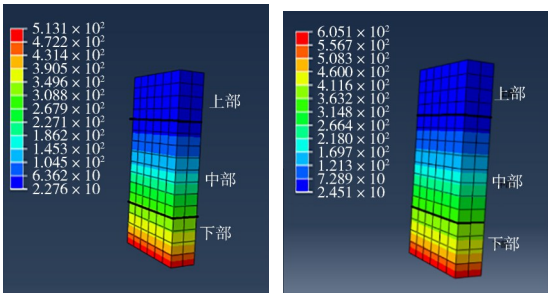
图 16　不同受火时间截面温度场

Fig. 16　Cross-sectional temperature fields under different fire exposure durations

2）连接件温度分布。

不同受火时间下 FRP 连接件的温度分布云图如图 17 所示。可见：受火 60 min 时，在下叶墙的 FRP 连接件温度范围为 513 ~308 ℃，约有 2/5 部分处于热降解温度 400 ℃以上，FRP 连接件还能与混

凝土保持一定的黏结锚固能力。受火 180 min 时，在下叶墙的 FRP 连接件温度范围为 605 ~363 ℃，约有 4/5 部分处于热降解温度 400 ℃以上，即 80% 以上 FRP 材料已经基本热降解，FRP 连接件基本丧失了与混凝土的黏结锚固能力，易发生连接件的锚固脱开破坏。李志杰[17]的火灾试验中外挂墙板受火 180 min 时也发生了连接件的锚固脱开破坏（图 18），说明大部分 FRP 连接件在达到 400 ℃以上时会基本丧失锚固黏结能力。



（a）受火 60 min　　（b）受火 180 min

图 17　不同受火时间 FRP 连接件的温度分布云图　℃

Fig. 17　Temperature contour plots of the FRP connector under different fire exposure durations



图 18　受火 180 min 后 FRP 连接件发生锚固脱开[17]

Fig. 18　Anchorage failure of the FRP connector (180 min fire exposure)

4　结　论

1）考虑热应力耦合的温度-位移场有限元分析结果与试验中的预制混凝土夹心保温墙体试件 W1 与 W2 的温度场响应吻合良好，该模型能较好地预测墙板的温度场分布。模型预测的变形响应与试验值墙体变形相差 2%~11%，基本能预测墙板的变形响应，但高温条件下墙板各部分材料间相互作用的变化更为复杂，模型可进一步优化。

2）带无机保温砂浆层的试件 W1 与不带保温层（即空气层）的试件 W2 相比，上叶墙的温度场分布基本没有差异；无机砂浆保温层延缓了下叶墙的热量传递，阻碍了下叶墙与空气的对流换热，使 W1 下叶墙内钢筋和混凝土的温度比 W2 更高（分别高约 20.8%、23.2%）；FRP 连接件作为上、下叶墙的热桥，温度分布基本不受无机保温砂浆层的影响；无机保温砂浆层虽然提升了墙板的抗弯刚度和组合受力，但两者均能满足 1 h 耐火极限的要求。

3）FRP 连接件在标准火灾中受火 60 min 内轻微损伤，达到玻璃化温度后仍能提供抗剪刚度，玻璃化温度对于判断墙板发生连接件破坏是偏保守的温度。增加平面外荷载将使墙板挠度变大，但对温度场无明显影响。受火 180 min 将导致 FRP 连接件丧失与混凝土的黏结锚固能力。

参　考　文　献

[1] LI Y, XUE W, YUN Y, et al. Reversed cyclic loading tests on precast concrete sandwich shear walls under different axial compression ratios[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 54: 104619.

[2] 朱筱俊，李向民，杨建，等. 预制复合保温墙体抗火性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2017，47(6)：1208-1215.

[3] HULIN T, HODICKY K, SCHMIDT J W, et al. Experimental investigations of sandwich panels using high performance concrete thin plates exposed to fire[J]. Materials and Structures, 2016, 49(9): 3879-3891.

[4] CHEN J, HAMED E, GILBERT R I. Structural performance of concrete sandwich panels under fire[J]. Fire Safety Journal, 2021, 121: 1-15.

[5] HUANG J Q, XU Y Y, HUANG H, et al. Structural behavior of FRP connector enabled precast geopolymer concrete sandwich panels subjected to one-side fire exposure[J]. Fire Safety Journal, 2022, 128: 103524.

[6] European Committee for Standardization. Design of concrete structures-part 1-2: general rules-structural fire design: EN 1992-1-2[S]. Brussel: European Committee for Standardization, 2004.

[7] ASLANI F, BASTAMI M. Constitutive relationships for normal- and high-strength concrete at elevated temperatures[J]. ACI Materials Journal, 2011, 108(4): 355-364.

[8] 李国强，韩林海，楼国彪，等. 钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2006.

[9] European Committee for Standardization. Design of steel structures-part 1.2: general rules-structural fire design: Eurocode 3[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 1993.

[10] 日本建筑省. 建筑物综合防火设计[M]. 孙金香，高温，译. 天津：天津翻译出版公司，1988.

[11] KELLER T, TRACY C, ZHOU A. Structural response of liquid-cooled GFRP slabs subjected to fire-part I: material and post-fire modeling[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(9): 1286-1295.

[12] 王晓璐，查晓雄. 高温下GFRP筋力学性能的试验研究[J]. 华南理工大学学报（自然科学版），2011，39（9）：75-81.

[13] ZAIDI A，MASMOUDI R. Thermal effect on fiber reinforced polymer reinforced concrete slabs[J]. Canadian Journal of Civil Engineering，2008，35（3）：312-320.

[14] International Organization for Standardization. Fire resistance tests-elements of building construction-part 1：ISO 834-1[S]. Geneva：International，Organization for Standardization，1999.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑设计防火规范：GB 50016—2014[S]. 北京：中国计划出版社，2014.

[16] 中国国家标准化管理委员会. 建筑构件耐火试验方法 第1部分 通用要求：GB/T 9978.1—2008[S]. 北京：中国计划出版社，2009.

[17] 李志杰. 灾害荷载下预制混凝土墙体试验研究[D]. 上海：同济大学，2014.