

# 火灾下部分包覆钢-混凝土组合构件 升温数值模拟分析

吴昊宇<sup>1</sup>, 吴培红<sup>1</sup>, 谢丰蔚<sup>1</sup>, 林雪娇<sup>2</sup>, 蒋首超<sup>3\*</sup>, 刘政君<sup>3</sup>

(1. 国家电网北京市电力公司经济技术研究院, 北京 100055; 2. 北京恒华伟业科技股份有限公司, 北京 100011; 3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为研究部分包覆钢-混凝土组合(steel-concrete partially encased composite, PEC)构件火灾下的传热性能, 首先采用PEC构件标准火灾试验验证了二维有限元模型, 然后对火灾下带有防火保护的PEC构件的升温过程及主要影响参数进行研究分析。研究表明, 不同防火保护条件下, PEC构件H型钢腹板最高点温度均位于翼缘与腹板交点处, PEC构件截面温度最高点位置均位于翼缘端部。H型钢截面形状系数、翼缘厚度、腹板厚度以及H型钢高度、宽度等参数对PEC构件升温均有影响, 其中影响较大的是翼缘厚度与H型钢宽度。通过将H型钢标准规格截面进行分组模拟, 计算PEC构件在标准升温条件下所需防火层厚度, 给出不同防火保护措施及不同耐火极限下, PEC构件防火层建议厚度设计值。

**关键词:** PEC构件; 传热分析; 标准升温; 耐火极限; 防火保护设计

**中图分类号:** TU391

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-9379(2025)01-0038-13

**DOI:** 10.13969/j.jzgjz.20230316001

## Temperature Rise Numerical Analysis of Steel-Concrete Partially Encased Composite Members Under Fire

WU Haoyu<sup>1</sup>, WU Peihong<sup>1</sup>, XIE Fengwei<sup>1</sup>, LIN Xuejiao<sup>2</sup>, JIANG Shouchao<sup>3\*</sup>, LIU Zhengjun<sup>3</sup>

(1. State Grid Beijing Economics and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, China;

2. Beijing Forever Technology Co., Ltd., Beijing 100011, China;

3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

\*Corresponding author: scjiang@tongji.edu.cn

**Abstract:** In order to study the heat transfer performance of steel-concrete partially encased composite (PEC) structures under fire condition, a 2D finite element model was firstly validated by the standard fire test of PEC members. Then it was used to analyze the temperature rise process and main influencing parameters of PEC members with fire-proof under the ISO 834 standard temperature rise curve. The research shows that under different fire protection conditions, the highest temperature point of H-steel web is located at the intersection of flange and web, and the highest temperature point of the whole PEC member section is located at the lower left corner of the flange. H-steel section shape factor,

收稿日期: 2023-03-16

作者简介:

吴昊宇(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事变电站土建结构设计、高性能建筑材料与变电站机械化施工技术方面的工作。

E-mail: 13811633152@163.com。

吴培红(1971—), 女, 学士, 高级工程师, 主要从事变电站土建设计, 高性能建筑材料与变电站机械化施工技术方面的工作。

通信作者:

蒋首超(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要从事工程结构抗火及建筑结构防灾韧性提升理论与技术方面的研究。

E-mail: scjiang@tongji.edu.cn。

flange thickness, web thickness, and H-section steel height and width all have an impact on the temperature rise of PEC member. And the major parameters are the thickness of the flange and the width of the H-steel. Through grouping simulation of H-steel with standard sections, the thickness of fire protection layer required by PEC structures under standard temperature rise condition is calculated. Then the suggested thickness design value of fire protection layer of PEC structures under different fire protection measures and different fire resistance limits is given.

**Keywords:** PEC member; heat transfer analysis; standard temperature rise; fire resistance limit; fire-proof design

部分包覆钢-混凝土组合 (steel-concrete partially encased composite, PEC) 构件由 H 型钢与翼缘之间填充的混凝土组合而成。型钢与混凝土的协同工作提高了构件的承载力和延性,因此 PEC 构件可以充分发挥型钢和混凝土的材料性能,具有良好的力学性能和经济性。此外,相对于无防火保护的型钢,PEC 构件裸露在外的型钢截面面积减小,所以其抗火性能也要优于无耐火保护的普通钢结构抗火性能,应用前景较好。然而在火灾高温的情况下,PEC 构件由于 H 型钢翼缘外露,钢材在无防火保护状态下仍会迅速升温导致其强度显著降低和混凝土的压碎及其刚度和强度的快速下降,从而使构件承载力下降甚至引发结构破坏。因此对 PEC 构件抗火性能进行深入分析研究及提出相应防火保护设计方法,对 PEC 构件的工程应用具有重要意义。

目前关于 PEC 构件的研究主要集中于其在常温下的受力性能。文献[1-3]对 PEC 结构柱在循环荷载下的力学性能进行了试验研究,并提出了新的力学模型。CHICOINE 等<sup>[4]</sup>对 5 个 PEC 短柱构件进行静载试验,结果表明构件破坏是由型钢翼缘板的局部屈曲和混凝土的破碎导致的,并通过参数分析提出了 PEC 柱轴向荷载承载力的改进计算式。JIANG 等<sup>[5-6]</sup>分别对 1 根传统复合梁和 3 根 PEC 梁进行了静载试验,发现包裹混凝土能够提高钢梁的局部屈曲抗力,并研究了部分包裹钢-混凝土连续梁的力学行为和弯矩重分布规律。XUE 等<sup>[7]</sup>根据包含 27 个大尺寸 PEC 梁试验结果的数据库对现有 PEC 梁剪切强度公式与模型进行评估与改进,通过应变协调确定混凝土与型钢对抗剪能力贡献的关系。陈以一等<sup>[8-11]</sup>对 6 根 PEC 柱以及 9 根 PEC 梁进行了常温下的加载试验,研究结果表明 PEC 构件具有良好的受力性能。同时通过数值模拟研究了局部稳定、抗弯刚度和承载力。ZHAO 等<sup>[12-13]</sup>通过试验与数值模拟分别对蜂窝状 PEC 梁的抗弯性能以及十字形截面的 PEC 柱在轴压力作用下的整体稳定性进行了研究。结果表明受压翼缘和内嵌混凝土显著提高了梁的受弯承载力和变形能力;实腹式 MSCs 对 PEC 柱承载力的增强能力强于蜂窝式 MSCs 对 PEC 柱承载力的增强能力,并提出了稳定承载力的计算式。

相比于常温工况,国内外少数学者对 PEC 构件在火灾高温下的性能进行了研究。MOURA CORREIA 等<sup>[14]</sup>通过特殊的试验装置模拟实际建筑中的端部约束作用,

对 PEC 柱的抗火性能进行了试验研究,所有柱均发生弯曲屈曲破坏。PILOTO 等<sup>[15-16]</sup>对 PEC 梁在火灾高温下的弯曲性能以及侧向扭转性能进行了多组试验研究,考虑了不同荷载比、温度和混凝土与型钢连接方式的影响,并与其在常温下的性能进行了对比。叶灵鹏等<sup>[17]</sup>通过数值模拟方法,研究了荷载比、防火保护厚度以及截面尺寸等对 PEC 梁耐火极限的影响,并提出了耐火极限计算式。在 PEC 构件抗火设计方面,欧洲规范 EC4<sup>[18]</sup>通过规定混凝土最小保护层厚度保证 PEC 柱的抗火性能,并给出了图表化的抗火设计内容。

虽然国内外学者针对 PEC 构件的力学性能展开了深入研究,但对火灾高温下的研究还有很多不足,相关规范中抗火设计方法的适用范围还很有限,也没有考虑实际工程中防火保护涂料的应用及其对火灾下 PEC 构件升温过程的影响。而火灾下的升温过程与温度场分布是研究结构抗火性能的重要基础。因此,本文将从工程实际出发,对带有防火保护措施的 PEC 构件在火灾高温下的传热过程进行分析研究。

## 1 PEC 构件火灾下升温影响参数研究

### 1.1 分析目的及判定标准

采用 ABAQUS 有限元软件,对 PEC 构件在 ISO 834 标准升温条件下的升温过程进行模拟,基于已有试验数据对所用有限元模型的有效性进行验证。基于该模型,对 PEC 构件在火灾下升温的主要影响因素进行参数分析。最后,以 H 型钢不超过临界温度为准则,计算分析 PEC 梁、柱在不同耐火极限要求<sup>[19]</sup>下不同防火保护方案所需的防火保护层厚度,为 PEC 构件的防火设计提供依据。其中,PEC 构件临界温度除耐火极限外还与荷载比相关,而本文主要针对传热进行分析并提供防火保护设计方法,因此根据 NRC 标准火灾试验选取临界温度为 538 °C<sup>[20]</sup>,约对应于 GB 51249—2017<sup>[21]</sup>中组合梁应力比为 0.55 的情况。

### 1.2 分析对象

本文选取建筑实例中 PEC 典型梁、柱截面,其 H 型钢截面尺寸如表 1~2 所示,共计 36 个梁截面,20 个柱截面。为简化计算过程,假设所计算梁、柱长度足够长,计算截面取梁、柱中部,将计算模型简化为二维平面。

表1 PEC典型梁截面

Table 1 Typical section of PEC beams

编号	规格/mm	编号	规格/mm
GL4	HN200×100×5.5×8	GKL7	H920×180×16×10
GL4	H350×150×4.5×6	GKL6	H350×180×6×14
GKL7	H400×150×6×8	GL1	H350×180×6×14
GL3	HN300×150×6.5×9	GKL4	H450×180×8×14
GKL5	HN300×150×6.5×9	GKL2	H550×200×6×10
GL4a	HN300×150×6.5×9	GKL1	H500×200×6×10
GKL2	H500×175×8×14	GL2	H500×200×6×10
GL5	H500×175×8×14	GKL3	H350×200×6×10
GKL1	H400×175×8×14	GKL2c	H380×200×7×10
GKL3	H400×180×6×8	GKL4	H400×200×8×10
GL1	H400×180×6×8	GL2	H400×200×8×10
GL6	H400×180×6×10	GKL2b	HW200×200×8×12
GKL2	H350×180×6×10	GKL9	H350×200×6×14
GKL2a	H350×180×6×10	GKL3	H500×200×8×14
GL2	H350×180×6×10	GL1	H500×200×8×14
GKL1	H500×180×8×10	GKL8	H400×200×8×14
GKL9	H380×180×8×10	GKL5	H500×250×10×25
GL5	H740×180×12×10	GKL6	H500×350×12×25

表2 PEC典型柱截面

Table 2 Typical section of PEC columns

编号	规格/mm	编号	规格/mm
GKZ7	H300×180×6×8	GKZ3	H450×250×8×12
GKZ4	H300×200×6×10	GKZ5	H460×250×8×14
GKZ2	H400×200×8×10	GKZ6	H450×300×8×12
GKZ1	H400×200×8×14	GKZ5	H400×300×8×12
GKZ1a	H400×200×8×14	GKZ2	H400×350×8×12
GKZ3	H500×200×12×25	GKZ6	H450×350×8×20
GKZ4	H500×220×8×14	GKZ3	H400×350×8×20
GKZ6	H500×220×12×25	GKZ1	H400×350×10×25
GKZ7	H350×250×6×10	GKZ2	H450×400×8×12
GKZ8	H300×250×6×10	GKZ5	H450×450×8×14

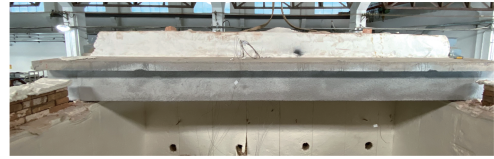
1.3 有限元模型的验证

本节基于足尺PEC梁受火试验结果<sup>[22]</sup>对有限元模型进行验证。

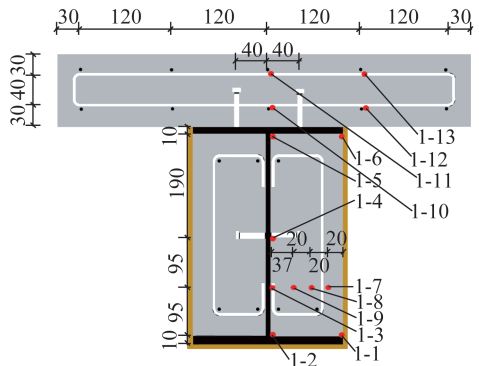
1.3.1 试验概况与有限元模型

试验中所用PEC梁构件及截面热电偶布置如图1所示<sup>[22]</sup>。梁跨度为5.5 m, 支座间距为5.1 m, 受火范围为

4.5 m, 采用H型钢的规格为H400 mm×180 mm×6 mm×10 mm, 防火保护措施为防火涂料全包保护, 3组试验编号为B1~B3, 其保护层平均厚度如表3所示。在ABAQUS软件中建立二维有限元模型对PEC构件的升温过程进行模拟, 如图2所示。梁上部混凝土板厚为100 mm, 宽度取为梁宽度的3倍。



a) 试验现场照片



b) PEC梁截面热电偶测点布置(单位: mm)

图1 PEC梁受火试验<sup>[22]</sup>

Fig. 1 Fire test of PEC beam<sup>[22]</sup>

表3 PEC构件防火层厚度实测值

Table 3 Measured thickness of fireproof layer of

PEC members

mm

编号	H型钢规格	防火层平均厚度
B1	H400×180×06×10	8.0
B2	H400×180×06×10	7.5
B3	H400×180×06×10	12.5

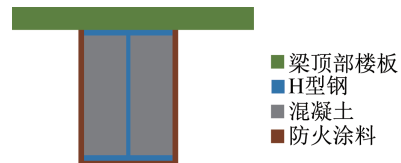


图2 二维有限元模型: 防火涂料全包保护

Fig. 2 2D finite element model: complete fireproof coating protection

1) 材料参数

在传热分析中, 主要材料参数包括密度、导热系数以及比热容。钢材以及混凝土土工参数根据规范 GB 51249—2017<sup>[21]</sup>选取, 防火涂料按实际取值, 如表4所示。

表4 材料热工参数

Table 4 Thermal parameters of materials

材料	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	导热系数/ ( $\text{w}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )	比热容/ ( $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )
钢材	7 850	45.0	600
防火涂料	300	0.1	1 000
混凝土	2 300	随温度变化	随温度变化

高温下普通混凝土的热工参数应按下列计算式确定,热传导系数 $\lambda_c$ 应按式(1)计算:

$$\lambda_c = 1.68 - 0.19 \frac{T_c}{100} + 0.0082 \left( \frac{T_c}{100} \right)^2 \quad (1)$$

混凝土比热容 $C_c$ 应按式(2)计算:

$$C_c = 890 + 56.2 \frac{T_c}{100} - 3.4 \left( \frac{T_c}{100} \right)^2 \quad (2)$$

式中: $T_c$ 为混凝土温度,单位为 $^\circ\text{C}$ 。

本次分析中考虑水分对混凝土升温过程的影响,对混凝土比热容进行修正。假设所有的水汽化均在温度为 $90\sim 110^\circ\text{C}$ 时完成,考虑一般混凝土含水量为4%,水的汽化热(在温度为 $100^\circ\text{C}$ 、1个大气压下)为 $2\,257.2\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,混凝土的密度取为 $2\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。每 $1\text{ m}^3$ 混凝土中的水汽化需要的热量为 $2\,300 \times 0.04 \times 2\,257.2 = 2.08 \times 10^5\text{ kJ}$ 。

混凝土在温度为 $100^\circ\text{C}$ 时的比热容按式(2)计算所得值为 $942.8\text{ J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ,因此每 $1\text{ m}^3$ 混凝土升温 $20^\circ\text{C}$ 所需要的热量为 $2\,300 \times 20 \times 942.8 = 4.34 \times 10^4\text{ J}$ 。因此,温度在 $90\sim 110^\circ\text{C}$ 之间时混凝土的比热容为 $\frac{2.08 \times 10^5 + 4.34 \times 10^4}{2\,300 \times 20} = 4.52 \times 10^3\text{ J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ,其余温度段均按式(2)计算取得。

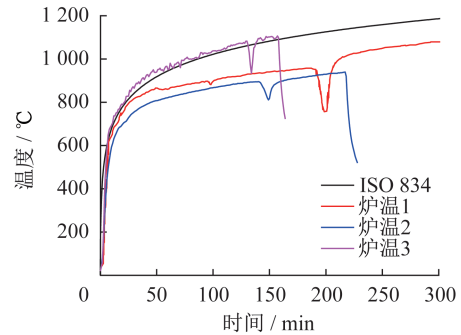
### 2) 升温曲线,分析步及单元设置

试验<sup>[22]</sup>中采用了ISO 834标准升温曲线,但与实测炉温曲线有一定差别。因此,有限元分析中以实测温度曲线作为PEC梁截面的温度输入。实测炉温曲线如图3所示。PEC梁为三面受火,包括防火层外表面以及混凝土板下表面。

采用Heat transfer分析步对升温过程进行模拟,单元类型为线性传热单元DC2D4,网格尺寸为 $10\text{ mm}$ ,构件初始温度为 $20^\circ\text{C}$ 。

### 3) 热量传递参数

热量传递的基本方式包括三种:热传导、热对流以及热辐射。在标准火灾下,PEC构件过火区域所受烟气热量传递方式为热对流与热辐射。在有限元模型中,PEC构件受火面热对流系数为 $25\text{ w}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ,综合辐射率 $r$ 根据标准AISC 360-16<sup>[23]</sup>选取,综合考虑烟气的辐射率以及辐射角系数的影响,本次分析取为0.5。背火面空气

图3 试验炉温曲线与ISO 834升温曲线<sup>[22]</sup>Fig. 3 Test furnace temperature curves and ISO 834 temperature curve<sup>[22]</sup>

温度为 $20^\circ\text{C}$ ,自然对流系数为 $9\text{ w}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ,热辐射系数与受火面的取值相同。

### 1.3.2 数值模拟结果与试验对比

选取试验结果中热电偶数据稳定的测点1-1、1-2与1-3进行对比,三者分别位于H型钢翼缘端部、翼缘与腹板交点以及交点上方 $95\text{ mm}$ 处。三次试验中,梁跨中截面选取测点升温曲线与数值模拟结果对比如图4所示。从图中可以看出,试验2与试验3中数值模拟结果偏低,这可能是因为试验过程中防火涂料开裂引起的等效热阻降低。但从整体来看,通过二维模型得到的升温曲线与试验结果拟合较好,因此该模型可用于PEC构件截面升温情况的数值模拟分析。

## 2 H型钢最高温度点数值模拟分析

### 2.1 研究对象选取

从PEC构件典型梁、柱截面中选取形状系数最大的梁、柱截面,在标准火灾、均匀受火 $2\text{ h}$ 的工况下,模拟分析出不同防火涂料翼缘边缘延伸长度下,H型钢翼缘与腹板最高温度点的分布情况。其中,所选梁构件编号为GL4,截面尺寸为 $\text{H}350\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 4.5\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ ,所选柱构件编号为GKZ7,截面尺寸为 $\text{H}300\text{ mm}\times 180\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ ,如表5所示。梁防火层厚度取 $20\text{ mm}$ ,柱防火层厚度取 $30\text{ mm}$ ,外包防火层沿翼缘边缘延伸长度为 $l$ (取值范围为 $0\sim\infty$ , $\infty$ 代表全包保护)。受火区域为防火层外边缘,以及H型钢填充混凝土外表面(包括混凝土板下表面)。PEC梁、柱截面模型如图5所示。

### 2.2 PEC梁、柱最高温度点分析

当防火层沿翼缘边缘延伸长度 $l=0\text{ mm}$ 时,PEC梁与H型钢受火 $2\text{ h}$ 的温度分布云图分别如图6~7所示。从图中可以看出,因为截面对称以及均匀受热,梁截面温度也呈现对称分布。根据梁温度分布云图,H型钢最高

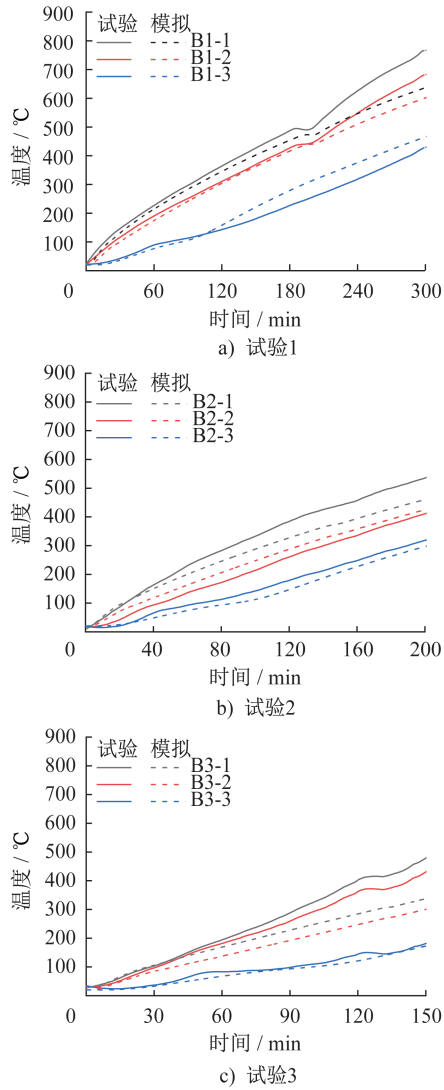


图4 升温曲线对比

Fig. 4 Comparison of temperature rise curves

表5 截面形状系数最大对应的梁、柱

Table 5 Beam and column corresponding to maximum section shape factor

构件编号	截面尺寸/mm	截面形状系数
GL4	H350×150×4.5×6	343.6
GKZ7	H300×180×6×8	285.3

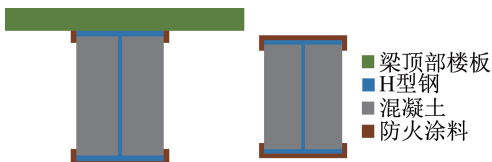


图5 PEC构件二维计算模型

Fig. 5 2D calculation model of PEC members

温度为 921.1 °C, 位于下翼缘端部, 腹板最高温度为 734.6 °C, 位于翼缘与腹板交点, 取这两点进行时程分析,

描绘最高温度点时间-温度变化曲线, 如图8所示。

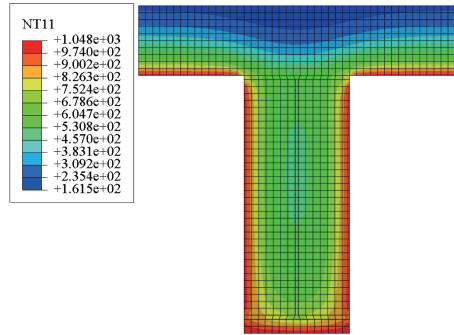


图6 PEC梁温度分布云图(单位: °C)

Fig. 6 Temperature distribution contour of PEC beam (unit: °C)

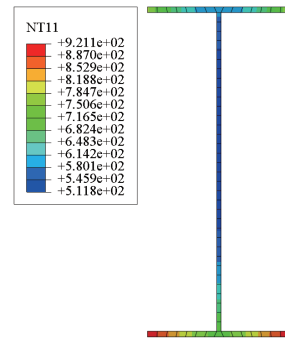


图7 H型钢温度分布云图(单位: °C)

Fig. 7 Temperature distribution contour of H-beam (unit: °C)

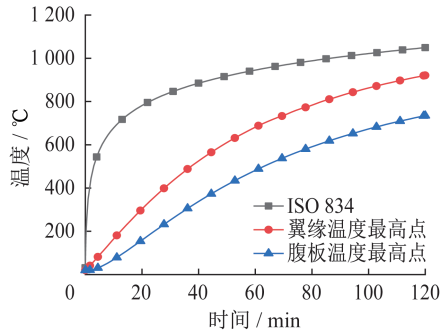


图8 翼缘与腹板温度最高点时间-温度曲线  
Fig. 8 Time-temperature curves at the highest points of flange and web temperatures

进一步通过有限元分析得到不同外包防火层沿翼缘延伸长度下, PEC梁、柱截面最高温度与腹板最高温度及对应的位置, 计算结果分别如表6~7所示。

由表中计算结果可知, 在不同PEC构件外包防火层延伸长度下, 受到标准火灾作用时, H型钢最高温度点均位于下翼缘端部, 腹板最高温度点均位于翼缘与腹板交点处, 而随着防火保护延伸长度的增加, 最高温度逐渐降低。

表6 不同翼缘边缘延伸长度下梁最高温度点

Table 6 Maximum temperature points under different flange edge extension lengths of PEC beam

$l/mm$	梁截面最高温度/ $^{\circ}C$	梁截面最高温度位置	腹板最高温度/ $^{\circ}C$	腹板最高温度位置
0	921.1	下翼缘端部	734.6	与下翼缘交点
20	613.8	下翼缘端部	573.7	与下翼缘交点
30	565.9	下翼缘端部	534.2	与下翼缘交点
40	526.2	下翼缘端部	500.1	与下翼缘交点
$\infty$	291.1	下翼缘端部	260.2	与下翼缘交点

表7 不同翼缘边缘延伸长度下柱最高温度点

Table 7 Maximum temperature points under different flange edge extension lengths of PEC column

$l/mm$	柱截面最高温度/ $^{\circ}C$	柱截面最高温度位置	腹板最高温度/ $^{\circ}C$	腹板最高温度位置
0	973.5	下翼缘端部	851.7	与下翼缘交点
20	694.4	下翼缘端部	653.3	与下翼缘交点
30	604.0	下翼缘端部	572.6	与下翼缘交点
40	561.4	下翼缘端部	535.7	与下翼缘交点
$\infty$	260.5	下翼缘端部	234.2	与下翼缘交点

### 3 H型钢截面尺寸对抗火性能的影响

在标准火灾作用且均匀受火时,分别改变H型钢翼缘厚度、腹板厚度、H型钢高度与宽度,对PEC构件截面进行受火升温分析,以截面最高温度即H型钢下翼缘端部的温度作为对比依据,得到各几何参数对梁、柱升温的影响程度,并对比得出主要影响参数。然后进一步分析主要影响参数对PEC梁、柱截面所需防火保护层厚度的影响。

#### 3.1 分析对象

所选梁构件编号为GLK6,截面尺寸为H500 mm $\times$ 350 mm $\times$ 12 mm $\times$ 25 mm;所选柱构件编号为GKZ7,截面尺寸为H300 mm $\times$ 180 mm $\times$ 6 mm $\times$ 8 mm。仍采用二维模型进行传热分析,如图5所示,其中梁防火层厚度为20 mm,柱防火层厚度为30 mm,翼缘延伸长度均为30 mm。

#### 3.2 PEC梁、柱升温参数影响结果

对PEC构件在ISO 834标准升温曲线下的升温过程进行数值模拟,分析梁、柱最高温度点升温幅值与H型钢翼缘厚度、腹板厚度以及H型钢高度、宽度的关系,计算结果如表8~9所示。

表8 PEC梁模拟结果

Table 8 Simulation results of PEC beams

变量	截面尺寸/mm	最高温度/ $^{\circ}C$	最高温差/ $^{\circ}C$
腹板厚度	H500 $\times$ 350 $\times$ 6 $\times$ 25	286.4	
	H500 $\times$ 350 $\times$ 12 $\times$ 25	279.3	18.2
	H500 $\times$ 350 $\times$ 20 $\times$ 25	268.2	
翼缘厚度	H500 $\times$ 350 $\times$ 12 $\times$ 06	436.3	
	H500 $\times$ 350 $\times$ 12 $\times$ 15	311.8	157.0
	H500 $\times$ 350 $\times$ 12 $\times$ 25	279.3	
型钢宽度	H500 $\times$ 150 $\times$ 12 $\times$ 25	417.6	
	H500 $\times$ 250 $\times$ 12 $\times$ 25	328.3	138.3
	H500 $\times$ 350 $\times$ 12 $\times$ 25	279.3	
型钢高度	H300 $\times$ 350 $\times$ 12 $\times$ 25	279.9	
	H400 $\times$ 350 $\times$ 12 $\times$ 25	279.6	0.6
	H500 $\times$ 350 $\times$ 12 $\times$ 25	279.3	

表9 PEC柱模拟结果

Table 9 Simulation results of PEC columns

变量	截面尺寸/mm	最高温度/ $^{\circ}C$	最高温差/ $^{\circ}C$
腹板厚度	H300 $\times$ 180 $\times$ 6 $\times$ 8	604.0	
	H300 $\times$ 180 $\times$ 10 $\times$ 8	593.5	19.9
	H300 $\times$ 180 $\times$ 14 $\times$ 8	584.1	
翼缘厚度	H300 $\times$ 180 $\times$ 6 $\times$ 8	604.0	
	H300 $\times$ 180 $\times$ 6 $\times$ 18	534.3	117.9
	H300 $\times$ 180 $\times$ 6 $\times$ 28	486.1	
型钢宽度	H300 $\times$ 180 $\times$ 6 $\times$ 8	604.0	
	H300 $\times$ 250 $\times$ 6 $\times$ 8	515.2	122.1
	H300 $\times$ 300 $\times$ 6 $\times$ 8	481.9	
型钢高度	H200 $\times$ 180 $\times$ 6 $\times$ 8	604.1	
	H300 $\times$ 180 $\times$ 6 $\times$ 8	604.0	0.1
	H400 $\times$ 180 $\times$ 6 $\times$ 8	604.0	

从表中数据可以看出,各几何参数均对H型钢最高温度有一定影响。随着各参数的增加,PEC构件截面升温幅值逐渐降低。而根据最高温度点温差易知,PEC构件在火灾中升温的主要几何影响参数为H型钢翼缘厚度及H型钢宽度,其影响远高于腹板厚度与H型钢高度。因此,实际抗火设计中可将H型钢翼缘厚度及H型钢宽度作为防火保护的设计参数。本节进一步分析在一定耐火极限要求下,H型钢翼缘厚度及H型钢宽度对PEC构件所需防火保护层厚度的影响。

### 3.3 翼缘厚度对PEC梁、柱升温的影响

在ISO 834标准升温条件下,模拟PEC梁分别受火90 min、120 min,PEC柱分别受火120 min、150 min、180 min,以H型钢最高温度不超过558℃为限值要求,不同翼缘厚度所需防火层厚度,对应热阻以及H型钢最高温度的计算结果如表10~14所示。

**表10 PEC梁所需防火层热阻与翼缘厚度关系(受火90 min)**  
**Table 10 Fireproof layer required by PEC beam under different flange thickness (under 90 min fire)**

截面尺寸/mm	防火层厚度/mm	热阻/ ( $\text{m}^2 \cdot (\text{K} \cdot \text{W})^{-1}$ )	最高温度/℃
H500×350×12×6	6	0.064	504.9
H500×350×12×10	5	0.050	499.5
H500×350×12×15	4	0.041	512.2
H500×350×12×20	3	0.036	551.1
H500×350×12×25	3	0.032	523.6
H500×350×12×30	3	0.029	500.7

**表11 PEC梁所需防火层热阻与翼缘厚度关系(受火120 min)**

**Table 11 Fireproof layer required by PEC beam under different flange thickness (under 120 min fire)**

截面尺寸/mm	防火层厚度/mm	热阻/ ( $\text{m}^2 \cdot (\text{K} \cdot \text{W})^{-1}$ )	最高温度/℃
H500×350×12×6	8	0.092	529.4
H500×350×12×10	6	0.074	542.6
H500×350×12×15	5	0.061	534.0
H500×350×12×20	4	0.053	558.4
H500×350×12×25	4	0.047	541.1
H500×350×12×30	4	0.039	526.7

**表12 PEC柱所需防火层热阻与翼缘厚度关系(受火120 min)**

**Table 12 Fireproof layer required by PEC column under different flange thickness (under 120 min fire)**

截面尺寸/mm	防火层厚度/mm	热阻/ ( $\text{m}^2 \cdot (\text{K} \cdot \text{W})^{-1}$ )	最高温度/℃
H300×180×6×8	8	0.131	537.8
H300×180×6×13	7	0.101	538.5
H300×180×6×18	6	0.090	553.9
H300×180×6×23	6	0.080	530.9
H300×180×6×28	5	0.071	512.4

由计算结果可知,翼缘厚度对梁、柱升温幅值的影响很大,随着翼缘厚度增大,所需防火保护层的厚度均大幅

**表13 PEC柱所需防火层热阻与翼缘厚度关系(受火150 min)**

**Table 13 Fireproof layer required by PEC column under different flange thickness (under 150 min fire)**

截面尺寸/mm	防火层厚度/mm	热阻/ ( $\text{m}^2 \cdot (\text{K} \cdot \text{W})^{-1}$ )	最高温度/℃
H300×180×6×8	12	0.238	531.7
H300×180×6×13	11	0.168	517.6
H300×180×6×18	10	0.146	515.0
H300×180×6×23	9	0.129	517.9
H300×180×6×28	8	0.110	527.0

**表14 PEC柱所需防火层热阻与翼缘厚度关系(受火180 min)**

**Table 14 Fireproof layer required by PEC column under different flange thickness (under 180 min fire)**

截面尺寸/mm	防火层厚度/mm	热阻/ ( $\text{m}^2 \cdot (\text{K} \cdot \text{W})^{-1}$ )	最高温度/℃
H300×180×6×8	16	0.508	532.6
H300×180×6×13	15	0.297	519.3
H300×180×6×18	13	0.250	534.9
H300×180×6×23	11	0.217	548.6
H300×180×6×28	10	0.169	552.7

减小。梁翼缘厚度从6 mm增加到25 mm,所需防火保护层的厚度减半;柱翼缘厚度从8 mm增加到28 mm,所需防火保护层的厚度约降低为原来的2/3。

### 3.4 H型钢宽度对梁、柱升温的影响

在ISO 834标准升温条件下,以H型钢最高温度不超过558℃为限值要求,模拟PEC梁分别受火90 min、120 min,PEC柱分别受火120 min、150 min、180 min时不同H型钢宽度所需防火层厚度、对应的热阻以及H型钢最高温度,结果如表15~19所示。

**表15 PEC梁所需防火层热阻与型钢宽度关系(受火90 min)**

**Table 15 Fireproof layer required by PEC beam under different width of H-beam (under 90 min fire)**

截面尺寸/mm	防火层厚度/mm	热阻/ ( $\text{m}^2 \cdot (\text{K} \cdot \text{W})^{-1}$ )	最高温度/℃
H500×150×12×25	4	0.043	507.1
H500×200×12×25	3	0.036	535.8
H500×250×12×25	3	0.033	525.2
H500×300×12×25	3	0.032	522.7
H500×350×12×25	3	0.032	521.6

其中在受火 180 min 标准升温曲线作用下,无论将防火层取多厚,柱截面为 H300 mm×150 mm×6 mm×8 mm 对应的 H 型钢最高温度均超过 600 °C。当防火层厚度为 30 mm,沿翼缘延伸长度为 30 mm,传热系数设为  $1 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{°C})^{-1}$  即热阻值无穷大时,得到的 H 型钢温度分布云图如图 9 所示,可以看出此时最高温度出现在腹板中间,而不是翼缘两端。其原因是腹板两侧填充的混凝土太薄,不足以有效阻止该构件在受火 180 min 标准升温模拟下的热量传递。针对这种情况,实际工程中可以将防火层全部包裹该构件,如图 10 所示,表 16~19 中计算结果也为全包防火层时得到的。

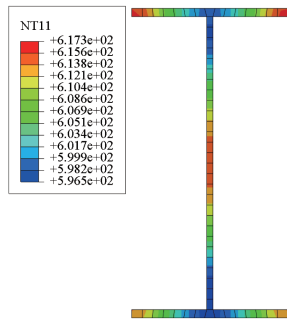


图 9 柱 H300 mm×150 mm×6 mm×8 mm 受火 3 h 温度分布云图(单位:°C)

Fig. 9 Temperature distribution cloud of column H300 mm×150 mm×6 mm×8 mm under 3 h fire (unit: °C)

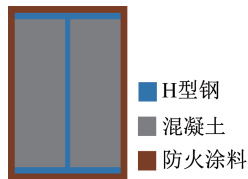


图 10 柱 H300 mm×150 mm×6 mm×8 mm 防火保护全包

Fig. 10 Complete fire coating protection of column H300 mm×150 mm×6 mm×8 mm

由计算结果可知,随着 H 型钢宽度的增加(150 mm 分别增加至 300 mm、350 mm),PEC 构件截面所需防火层厚度逐渐减小,最小值约为初始值的 2/3 左右。另一方面,H 型钢宽度直接影响了填充混凝土的厚度,为保证满足最高温度的限值要求,需要针对不同截面尺寸采取不同的防火保护措施。

#### 4 典型 PEC 梁、柱防火层厚度计算

在标准火灾、均匀受火工况下,根据翼缘厚度及 H 型钢宽度,对标准规格截面分组并计算,选取每组中形状系数最大的截面进行有限元分析。以 H 型钢最高温度不超过 558 °C 为限值要求,通过数值模拟计算梁在 90 min、

表 16 PEC 梁所需防火层热阻与型钢宽度关系(受火 120 min)

Table 16 Fireproof layer required by PEC beam under different width of H-beam (under 120 min fire)

截面尺寸/mm	防火层厚度/mm	热阻/ ( $\text{m}^2 \cdot (\text{K} \cdot \text{W})^{-1}$ )	最高温度/°C
H500×150×12×25	6	0.077	532.0
H500×200×12×25	5	0.057	519.1
H500×250×12×25	4	0.050	553.7
H500×300×12×25	4	0.047	546.7
H500×350×12×25	4	0.046	544.6

表 17 PEC 柱所需防火层热阻与 H 型钢宽度关系(受火 120 min)

Table 17 Fireproof layer required by PEC column under different width of H-beam (under 120 min fire)

截面尺寸/mm	防火层厚度/mm	热阻/ ( $\text{m}^2 \cdot (\text{K} \cdot \text{W})^{-1}$ )	最高温度/°C
H300×150×6×8	10	0.176	531.7
H300×180×6×8	9	0.131	515.9
H300×200×6×8	8	0.117	529.6
H300×250×6×8	7	0.100	542.5
H300×300×6×8	7	0.093	535.3

表 18 PEC 柱所需防火层热阻与 H 型钢宽度关系(受火 150 min)

Table 18 Fireproof layer required by PEC column under different width of H-beam (under 150 min fire)

截面尺寸/mm	防火层厚度/mm	热阻/ ( $\text{m}^2 \cdot (\text{K} \cdot \text{W})^{-1}$ )	最高温度/°C
H300×150×6×8	14	0.441	542.3
H300×180×6×8	13	0.242	513.6
H300×200×6×8	12	0.192	511.3
H300×250×6×8	11	0.147	501.6
H300×300×6×8	10	0.131	512.1

表 19 PEC 柱所需防火层热阻与 H 型钢宽度关系(受火 180 min)

Table 19 Fireproof layer required by PEC column under different width of H-beam (under 180 min fire)

截面尺寸/mm	防火层厚度/mm	热阻/ ( $\text{m}^2 \cdot (\text{K} \cdot \text{W})^{-1}$ )	最高温度/°C
H300×150×6×8	10	0.099	547.0
H300×180×6×8	16	0.526	539.2
H300×200×6×8	15	0.341	530.0
H300×250×6×8	14	0.219	506.3
H300×300×6×8	13	0.182	502.8

120 min,柱在 120 min、150 min、180 min 受火作用下,各防火构造所需要的防火层厚度。

4.1 防火构造措施

本次计算中共考虑2种防火构造措施,如图11a)~b)所示,第1种只采用外包防火涂料,分为全包保护与部分保护( $l=30\text{ mm}$ )。第2种为砂浆与防火涂料混合保护,如图11c)所示,砂浆平行于腹板设置,防火涂料平行于翼缘设置,砂浆厚度范围为30~50 mm,尽量保持为30 mm。砂浆热工参数取值如表20所示。

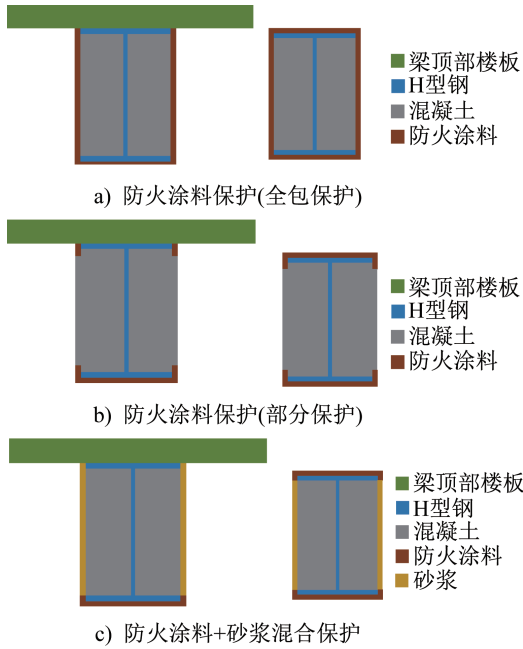


图 11 防火保护措施

Fig. 11 Fireproof measures

表 20 砂浆热工参数

Table 20 Thermal parameters of mortar

材料	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	导热系数/ ( $\text{w}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )	比热容/ ( $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )
砂浆	2 000	1.1	1 065.5

4.2 典型梁、柱截面分组

由上一小节结论可知,影响H型钢升温较大的因素为H型钢宽度及翼缘厚度,现以H型钢宽度及翼缘厚度均相同为原则将标准规格截面分为一组,选取每组中截面形状系数最大的截面作为分析对象,典型梁、柱分组及分析对象如表21~22所示,组号按截面形状系数由小到大排序。

4.3 单设防火涂料时所需防火层厚度

单设防火涂料所需要的厚度要求以及截面最高温度

表 21 典型梁截面分组

Table 21 Section grouping of typical beams

组号	构件编号	截面尺寸/mm	截面形状系数
b1	GKL6	H500×350×12×25	88.5
b2	GKL5	H500×250×10×25	101.8
b3	GKL2b	HW200×200×8×12	158.5
b4	GKL9	H350×200×6×14	171.0
b5	GKL2	H500×175×8×14	173.9
b6	GL1	H350×180×6×14	176.1
b7	GL6	H400×180×6×10	225.8
b8	GL3	HN300×150×6.5×9	228.8
b9	GKL2	H550×200×6×10	235.1
b10	GL1	H400×180×6×8	256.2
b11	GKL7	H400×150×6×8	263.2
b12	GL4	HN200×100×5.5×8	263.8
b13	GL4	H350×150×4.5×6	343.6

表 22 典型柱截面分组

Table 22 Section grouping of typical columns

组号	构件编号	截面尺寸/mm	截面形状系数
c1	GKZ1	H400×350×10×25	103.8
c2	GKZ6	H500×220×12×25	113.2
c3	GKZ3	H500×200×12×25	115.3
c4	GKZ6	H450×350×8×20	132.2
c5	GKZ5	H450×450×8×14	168.0
c6	GKZ5	H460×250×8×14	182.1
c7	GKZ1	H400×200×8×14	184.7
c8	GKZ4	H500×220×8×14	187.6
c9	GKZ2	H450×400×8×12	191.0
c10	GKZ2	H400×350×8×12	191.4
c11	GKZ6	H450×300×8×12	196.5
c12	GKZ3	H450×250×8×12	200.3
c13	GKZ7	H350×250×6×10	241.8
c14	GKZ4	H300×200×6×10	244.4
c15	GKZ7	H300×180×6×8	285.3

的计算结果如表23~24所示。从表中数据可以发现,所需防火层厚度随着受火时间的增加而增加。总体来看,随着截面形状系数的增大,所需防火层厚度也逐渐增加。但截面形状系数不是唯一影响因素,例如b11与b12组的形状系数基本相同,翼缘厚度均为8 mm,H型钢宽度差为50 mm,在防火层部分保护,受火时间为120 min的情况下,所需防火层厚度相差4 mm。另一方面,全包保护

相对部分保护所需防火层厚度更小,二者差异随着截面形状系数增加而逐渐增大。

**表 23 典型梁截面计算结果(单设防火涂料)**  
**Table 23 Calculation results of typical beam sections(setting fireproof coatings)**

组号	部分保护				全包保护			
	受火 90 min		受火 120 min		受火 90 min		受火 120 min	
	厚度/mm	温度/°C	厚度/mm	温度/°C	厚度/mm	温度/°C	厚度/mm	温度/°C
b1	3	523.6	4	541.1	3	510.4	4	513.9
b2	3	531.5	5	502.6	3	509.8	4	526.7
b3	4	550.8	7	516.2	4	514.8	5	549.9
b4	5	505.5	7	525.0	4	523.6	6	500.8
b5	4	548.1	7	523.7	4	505.8	5	542.6
b6	5	515.4	7	541.7	4	527.7	6	507.9
b7	5	529.5	8	521.3	4	539.9	6	518.8
b8	6	512.2	9	533.7	4	550.3	6	537.7
b9	5	520.2	8	505.1	4	536.8	6	512.6
b10	5	545.5	8	536.6	4	554.3	6	531.9
b11	6	524.5	9	544.0	5	500.4	6	546.9
b12	8	546.9	13	557.5	5	552.1	8	526.3
b13	6	554.1	10	543.9	5	528.2	7	527.5

**表 24 典型柱截面计算结果(单设防火涂料)**  
**Table 24 Calculation results of typical column sections (setting fireproof coatings)**

组号	部分保护						全包保护					
	受火 120 min		受火 150 min		受火 180 min		受火 120 min		受火 150 min		受火 180 min	
	厚度/mm	温度/°C	厚度/mm	温度/°C	厚度/mm	温度/°C	厚度/mm	温度/°C	厚度/mm	温度/°C	厚度/mm	温度/°C
c1	5	503.1	5	523.2	7	542.4	4	542.2	5	547.9	6	547.6
c2	5	521.6	5	512.2	9	520.7	4	545.1	5	557.2	7	513.4
c3	5	535.3	5	500.9	10	520.8	4	551.1	6	505.2	7	524.3
c4	5	545.3	5	521.6	8	545.3	5	514.3	6	524.5	7	533.5
c5	5	521.6	5	547.5	9	533.4	5	544.5	6	552.5	7	558.4
c6	6	528.3	6	531.0	10	539.2	5	539.1	7	502.4	8	519.9
c7	7	511.8	7	536.4	12	537.6	5	547.2	7	515.8	8	539.7
c8	6	538.5	6	517.8	12	514.6	5	542.2	7	507.9	8	528
c9	6	536.9	6	526.0	10	519.8	5	557.4	7	514.1	8	526.1
c10	6	535.6	6	527.1	10	523.2	5	554.3	6	512.3	8	525.3
c11	6	536.0	6	530.9	10	531.2	5	551.7	7	511.2	8	525.4
c12	7	501.6	7	513.1	11	526.4	5	551.3	7	513.5	8	530.5
c13	7	526.1	7	538.2	12	530.1	6	514.3	7	537.4	9	516.0
c14	7	550.3	7	547.9	14	533.7	6	522.7	7	553.6	9	539.1
c15	8	537.8	8	531.7	16	532.6	6	539.1	8	528.9	9	555.3

#### 4.4 设防火涂料+砂浆时所需防火层厚度

组合外包砂浆与防火涂料时,各组所需要的防火涂料厚度的计算结果,如表25~26所示。从表中数据可知,当砂浆厚度基本不变时,所需防火层厚度随耐火时间以及截面形状系数的增加而增加。通过与仅采用防火涂料

作为防火保护措施的组别对比发现,采用砂浆组合防火时,对防火涂料的厚度要求很高甚至达到50 mm,同时考虑到施工难易程度以及经济性,这种防火保护措施并不适用于实际工程。

表25 典型梁截面计算结果(设防火涂料+砂浆)

Table 25 Calculation results of typical beam sections (setting fireproof coatings + mortar)

组号	受火 90 min			受火 120 min			组号	受火 90 min			受火 120 min		
	砂浆厚度/mm	防火层厚度/mm	温度/°C	砂浆厚度/mm	防火层厚度/mm	温度/°C		砂浆厚度/mm	防火层厚度/mm	温度/°C	砂浆厚度/mm	防火层厚度/mm	温度/°C
b1	30	4	513.5	30	6	539.9	b8	30	10	544.4	30	30	550.1
b2	30	4	534.1	30	8	529.1	b9	30	8	541.1	30	20	531.0
b3	30	6	552.8	30	15	535.3	b10	30	10	534.6	30	25	533.7
b4	30	7	539.3	30	15	538.9	b11	30	10	546.9	30	30	549.6
b5	30	7	534.0	30	15	549.6	b12	30	25	545.6	40	50	556.7
b6	30	8	535.6	30	20	536.5	b13	30	15	535.0	30	45	557.5
b7	30	8	545.5	30	25	531.3							

表26 典型柱截面计算结果(设防火涂料+砂浆)

Table 26 Calculation results of typical column sections (setting fireproof coatings + mortar)

组号	受火 120 min			受火 150 min			受火 180 min		
	砂浆厚度/mm	防火层厚度/mm	温度/°C	砂浆厚度/mm	防火层厚度/mm	温度/°C	砂浆厚度/mm	防火层厚度/mm	温度/°C
c1	30	7	537.6	30	15	553.9	30	20	521.6
c2	30	10	523.9	30	20	532.3	30	40	554.1
c3	30	15	537.0	30	25	530.5	40	25	545.4
c4	30	8	553.2	30	15	528.9	30	20	553.6
c5	30	15	518.8	30	25	528.6	30	35	554.9
c6	30	15	512.6	30	25	529.7	30	45	552.0
c7	30	15	538.4	30	30	556.7	40	40	545.8
c8	30	15	527.9	30	30	539.1	40	30	551.4
c9	30	15	512.9	30	25	543.5	30	35	552.9
c10	30	10	557.1	30	20	529.7	30	30	538.5
c11	30	15	506.2	30	20	541.8	30	30	555.7
c12	30	15	521.0	30	25	536.0	30	45	556.6
c13	30	15	546.5	30	30	545.8	40	30	556.8
c14	30	20	533.1	30	50	547.1	40	50	554.6
c15	30	30	536.4	40	35	551.0	50	50	542.0

综合考虑来看,采用单设防火涂料作为防火层并采用全包保护措施时,所需防火层厚度更小,同时施工简单容易实现。

## 5 结论

本文针对火灾下部分包覆钢-混凝土组合结构的传

热性能开展了研究。基于PEC构件受火试验验证了二维有限元模型的有效性,然后通过数值模拟方法对火灾下PEC构件截面升温情况进行了参数分析,并针对典型PEC梁、柱截面给出了不同防火保护措施的对比结果。主要结论如下:

(1) 在标准火灾作用下,PEC构件截面最高温度位

于H型钢翼缘端部,H型钢腹板最高温度位于与翼缘交界处。

(2) 在相同的防火保护条件下,对PEC构件在火灾下升温影响最大的因素为H型钢翼缘厚度以及宽度。随着H型钢几何参数增加,PEC构件截面最高温度逐渐降低。

(3) 基于耐火极限以及临界温度的要求,对PEC梁、柱截面在不同防火保护措施作用下的防火层厚度进行了计算。随着截面形状系数增加,PEC构件对防火层厚度的要求逐渐增加;相比于砂浆混合保护措施,仅采用防火涂料进行防火保护的方法更有效。而对比全包保护与部分保护,全包保护所需防火层厚度相对更小且施工简单,因此实际工程中应对PEC构件采取防火涂料全包保护的方法。

(4) 本文提出的数值模拟方法为PEC构件的防火保护设计提供了依据,实际应用中可根据耐火极限与临界温度要求对防火层厚度进行计算。

## 参考文献:

- [ 1 ] ELNASHAI A S, TAKANASHI K, ELGHAZOULI A Y, et al. Experimental behaviour of partially encased composite beam-columns under cyclic and dynamic loads[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1991, 91(2): 259-272. DOI: 10.1680/iicep.1991.14982.
- [ 2 ] ELNASHAI A S, ELGHAZOULI A Y. Performance of composite steel/concrete members under earthquake loading. part I: analytical model [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1993, 22(4): 315-345. DOI: 10.1002/eqe.4290220404.
- [ 3 ] ELGHAZOULI A Y, ELNASHAI A S. Performance of composite steel/concrete members under earthquake loading. part II: parametric studies and design considerations[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1993, 22(4): 347-368. DOI: 10.1002/eqe.4290220405.
- [ 4 ] CHICOINE T, TREMBLAY R, MASSICOTTE B, et al. Behavior and strength of partially encased composite columns with built-up shapes[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(3): 279-288. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:3(279).
- [ 5 ] JIANG Y C, HU X M, HONG W, et al. Investigation on partially concrete encased composite beams under hogging moment[J]. Advances in Structural Engineering, 2017, 20(3): 461-470. DOI: 10.1177/1369433216654148.
- [ 6 ] JIANG Y C, HU X M, HONG W, et al. Experimental study and theoretical analysis of partially encased continuous composite beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 117: 152-160. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.10.009.
- [ 7 ] XUE Y C, HAO N, YANG Y, et al. A novel shear strength model for partially encased composite (PEC) beams based on strain compatibility [J]. Engineering Structures, 2022, 267: 114660. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114660.
- [ 8 ] 陈以一, 林俊星, 李杰. 部分包覆钢-混凝土组合构件中主钢件翼缘的局部稳定性能研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(7): 1-6. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.07.001.
- CHEN Yiyi, LIN Junxing, LI Jie. Research on local stability performance of main steel flange in partially-encased composite steel and concrete members[J]. Building Structure, 2021, 51(7): 1-6. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.07.001. (in Chinese)
- [ 9 ] CHEN Y Y, WANG T, YANG J, et al. Test and numerical simulation of partially encased composite columns subject to axial and cyclic horizontal loads[J]. International Journal of Steel Structures, 2010, 10(4): 385-393. DOI: 10.1007/BF03215846.
- [ 10 ] CHEN Y Y, LI W, FANG C. Performance of partially encased composite beams under static and cyclic bending[J]. Structures, 2017, 9: 29-40. DOI: 10.1016/j.istruc.2016.09.004.
- [ 11 ] 肖锦, 李杰, 陈以一. T形截面部分包覆钢-混凝土组合梁抗弯刚度及承载力试验研究[J]. 结构工程师, 2020, 36(2): 149-156. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2020.02.020.
- XIAO Jin, LI Jie, CHEN Yiyi. Experimental study on flexural rigidity and bearing capacity of T-section partially encased composite beams [J]. Structural Engineers, 2020, 36(2): 149-156. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2020.02.020. (in Chinese)
- [ 12 ] ZHAO B D, HUO H W, RAN C L, et al. Flexural behavior of castellated partially encased composite (PEC) beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 214: 108509. DOI: 10.1016/j.jcsr.2024.108509.
- [ 13 ] ZHAO B D, SHEN Y L, WANG B, et al. Global stability capacity of partially encased composite columns with cruciform-shaped section under axial compression [J]. Structures, 2024, 66: 106839. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106839.
- [ 14 ] MOURA CORREIA A J P, RODRIGUES J P C. Fire resistance of partially encased steel columns with restrained thermal elongation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(4): 593-601. DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.12.002.
- [ 15 ] PILOTO P A G, GAVILÁN A B R, ZIPPONI M, et al. Experimental investigation of the fire resistance of partially encased beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 80: 121-137. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.013.
- [ 16 ] PILOTO P A G, RAMOS-GAVILÁN A B, GONÇALVES C, et al. Experimental bending tests of partially encased beams at elevated temperatures[J]. Fire Safety Journal, 2017, 92: 23-

41. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.05.014.
- [17] 叶灵鹏, 朱浩川, 肖志斌, 等. 部分包覆钢-混凝土组合梁抗火性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(10): 54-62. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.10.006.
- YE Lingpeng, ZHU Haochuan, XIAO Zhibin, et al. The fire resistance of partially encased composite steel and concrete beams[J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(10): 54-62. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.10.006. (in Chinese)
- [18] European Committee for Standardization. Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures—Part 1.2: General Rules Structural Fire Design: EN 1994-1-2: 2007[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2007.
- [19] 中国工程建设标准化协会. 部分包覆钢-混凝土组合结构技术规程: T/CECS 719—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Partially-Encased Composite Structures of Steel and Concrete: T/CECS 719—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. (in Chinese)
- [20] STANZAK W W, LIE T T. Fire resistance of unprotected steel columns[J]. Journal of the Structural Division, 1973, 99(5): 837-852. DOI: 10.1061/jsdeag.0003508.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家市场监督管理总局. 建筑钢结构防火技术规范: GB 51249—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Fire Safety of Steel Structures in Buildings: GB 51249—2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017. (in Chinese)
- [22] 刘政君. 部分包覆钢-混凝土组合构件抗火设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2023.
- LIU Zhengjun. Research on design for fire resistance of steel-concrete partially encased composite structural members[D]. Shanghai: Tongji University, 2023. (in Chinese)
- [23] American Institute of Steel Construction. Specification for Structural Steel Buildings: ANSI/AISC 360-16[S]. Farmington Hills: American Institute of Steel Construction, 2016.