

火灾作用下预应力混凝土 T 梁温度场分析

游锦程, 陈苗, 王中强

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:为给实际工程中预应力混凝土结构在火灾条件下的热响应评估及其抗火设计提供理论依据, 本文通过开展火灾高温作用下的持温试验及有限元模拟研究, 探讨火灾温度、持温时间以及保护层厚度对预应力混凝土 T 梁内部温度场的影响。基于试验获得不同梁截面的升温曲线, 并利用有限元软件 ABAQUS 建立 21 组不同条件下的预应力混凝土 T 梁非线性瞬态温度场模型, 系统分析受火时间、受火温度及混凝土保护层厚度等参数对温度场分布的影响规律。结果表明: 在恒温 800 °C 条件下, T 梁受火 1、2、3 h 时的最高温度分别为 780、790、793 °C; 而在恒时 3 h 情况下, 当环境温度分别为 600、700、800 °C 时, T 梁的最高温度分别为 592、693、794 °C。此外, 增加混凝土保护层厚度可以有效减缓火灾高温向内部结构的传递, 显著降低钢筋和预应力筋的温度, 从而减少材料损伤。本文成果可为实际工程中预应力混凝土结构在火灾条件下的热响应评估及其抗火设计提供理论依据与技术借鉴。

关键词: 预应力混凝土 T 梁; 火灾试验; 温度场; 有限元分析

中图分类号: TU375.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)08-0034-07

doi: 10.13402/j.gjcs.2025.08.099

Temperature field analysis of prestressed concrete T-beam under fire action

YOU Jincheng, CHEN Miao, WANG Zhongqiang

(College of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: In order to provide a theoretical basis for the evaluation of the thermal response of prestressed concrete structures under fire conditions and their fire resistance design in practical engineering, the effects of fire temperature, temperature holding time and protective layer thickness on the internal temperature field of prestressed concrete T beams are discussed by carrying out temperature holding tests and finite element simulation studies under the action of high temperature of fire. Based on the experiments, the heating curves of different beam sections are obtained, and 21 sets of nonlinear transient temperature field models of prestressed concrete T-beams under different conditions are established by using the finite element software ABAQUS, and the influence law of fire time, fire temperature and concrete protective layer thickness on the temperature field distribution is systematically analyzed. The results show that the maximum temperature of the T beam at 1, 2 and 3 h is 780, 790 and 793 °C, respectively, under the constant temperature of 800 °C. In the case of constant 3 h, when the ambient temperature is 600, 700 and 800 °C, the maximum temperature of the T beam is 592, 693 and 794 °C, respectively. In addition, increasing the thickness of the concrete protective layer can effectively slow down the

收稿日期: 2024-10-30

基金项目: 湖南省教育厅科学研究资助项目(23A0248); 先进工程材料与结构力学行为及智能控制湖南省高校重点实验室开放基金资助项目(13KA05); 长沙理工大学土木工程重点学科创新性资助项目(13ZDXK08); 长沙理工大学研究生科研创新资助项目(CSLGCX23036)

作者简介: 游锦程(2001—), 男, 硕士研究生, 从事结构防灾减灾的研究。

通信作者: 王中强(1974—), 男, 副教授, 从事预应力混凝土结构、混凝土结构抗火、结构防灾减灾方面的研究。

transfer of fire temperature to the internal structure, and significantly reduce the temperature of steel bars and prestressed bars, thereby reducing material damage. The results can provide theoretical basis and technical reference for the evaluation of the thermal response of prestressed concrete structures under fire conditions and their fire resistance design in actual engineering.

Key words: prestressed concrete T-beam; fire test; temperature field; finite element analysis

由于线路老化以及对消防安全的疏忽, 高层建筑火灾时有发生, 给人们的生命财产安全带来了巨大的经济损失。预应力混凝土 T 梁作为高层建筑中常用的结构构件, 其结构损伤情况与温度场分布密切相关。目前, 关于预应力混凝土 T 梁耐火性能的分析鲜有报道, 因此, 对其进行火灾后温度场分析具有重要意义。

陆洲导等^[1]提出了钢骨混凝土柱在高温下温度分布的数值计算方法, 并通过编制有限单元法计算程序验证了该方法的正确性和可靠性; 刘桥等^[2]通过对比试验研究了钢筋混凝土梁在常温及火灾后的抗弯性能, 其有限元分析得到的升降温截面温度场和火灾后抗弯性能结果均与试验结果吻合较好, 表明该方法可用于火灾后梁体性能评估; 许肇峰等^[3]对混凝土空心板进行了火灾试验和有限元模拟, 探讨了温度、截面特征、跨径以及挖空率等因素对温度场分布规律的影响; 王玉镯等^[4]采用有限元模拟方法分析了火灾过程中钢筋混凝土梁内部温度场的分布规律: 升温段的温度场呈现外部高温、内部低温的层状结构, 降温段则表现为外部低温、内部高温的圈状分布; 王卫华等^[5]对带楼板钢筋混凝土 T 形梁火灾温度场进行模拟, 发现混凝土内部升温速度明显滞后于受火面。

总体而言, 国内外学者在高温环境下钢筋混凝土结构温度场分布方面已开展较多研究, 但针对预应力混凝土 T 型截面温度场影响的研究仍较为匮乏。本文围绕三面受火条件下预应力混凝土 T 梁在 ISO-384 标准升温曲线作用下温度场展开试验研究, 并基于有限元软件 ABAQUS 建立 21 组不同工况下的温度场模型, 获得不同环境温度、受火时间保护层厚度条件下的温度场分布规律, 以期在高温后钢筋混凝土结构受力性能分析提供借鉴。

1 预应力混凝土 T 梁火灾试验

1.1 试验设计及试件材料

试验共包括 3 根预应力混凝土 T 梁, 混凝土强

度等级为 C40, 保护层厚度为 25 mm。火灾试验的升温过程依据 ISO-834 标准升温曲线进行, 升至 800 °C 后保持温度恒定进行恒温阶段。试验梁依据其受火时间 (min) 依次编号为 PTL-60、PTL-120 及 PTL-180, 具体尺寸及配筋如图 1 所示。在受火过程中, 预埋于 T 梁内部的 K 型热电偶用于记录温度变化。每个试验梁布置 5 个温度测点, 分别用于测量受拉区钢筋 (测点 1)、预应力钢筋 (测点 2) 以及翼缘板内部受压钢筋 (测点 3~5) 的温度变化情况。温度测点的具体布置方式如图 2 所示。

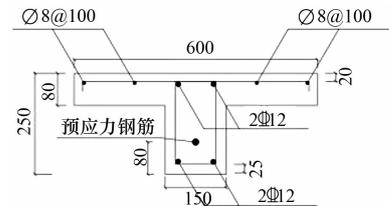


图 1 混凝土 T 梁设计

mm

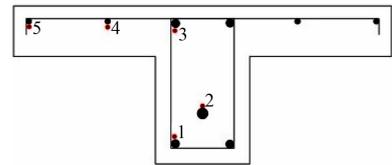


图 2 热电偶位置布置

模拟火灾升温及持温试验通过高温试验炉进行, 试验在实验室环境中开展。试验过程中, 将试验梁吊装至试验炉内, 预先布置在梁内的热电偶引出线与外部测温仪器连接, 并在试验梁顶部铺设防火岩棉, 以维持温度梯度, 有助于更准确地研究温度分布及其变化规律, 并进一步提高试验过程的安全性。具体试验设备如图 3 所示。



图 3 高温试验炉

1.2 试验数据

当火灾温度为 800 °C 时, 试验梁分别在受火持续时间为 60、120、180 min 的条件下, 实测 T 梁截面的升温曲线如图 4 所示。由图 4 可知: 测点 2~5 的升温过程滞后于测点 1, 且距离受火面越远, 升温滞后现象越明显。试验中, T 梁处于三面受火状态, 梁顶面为背火面, 翼缘板相当于单面受火。因此, 测点 1 因靠近受火面, 温度上升较快; 而测点 2~5 由于位置较深或未直接受火, 升温速度相对较慢。其中, 测点 2 升温较慢是因为其距离受火面较远, 加之混凝土材料本身具有热惰性, 导致热量传递缓慢, 因此温度变化不明显。测点 3~5 由于位于翼缘板内, 在三面受火的试验条件下, 这些测点并未直接受火, 因此温度变化较小。当持温时间由 60 min 延长至 120 min 后, 测点 1 温度已达到 800 °C, 热量继续向内部传导, 致使测点 2 温度逐渐升高; 当持温时间增至 180 min 时, 测点 1 温度维持在 800 °C 不变, 但其周围混凝土内部温度持续上升, 使得测点 2 温度进一步升高。

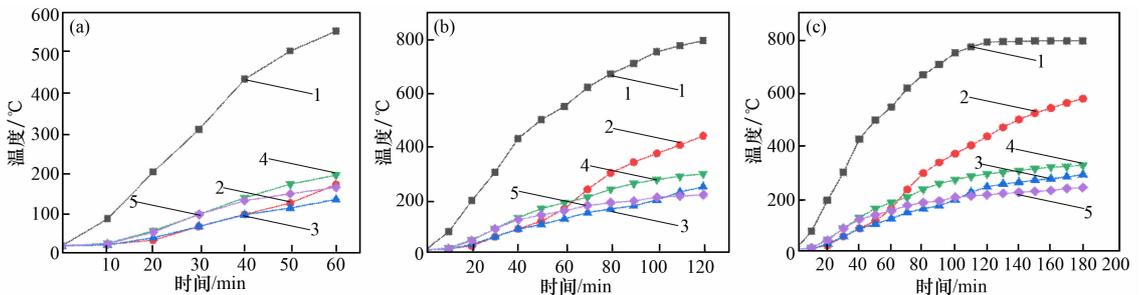
1.3 试验后试验梁外观特征

持温试验结束后, 待高温试验炉及试验梁自然冷却至常温, 观察不同持温时间下试验梁的外

观变化, 结果如图 5 所示。由图 5 可知: 在模拟火灾高温作用后, 混凝土表面出现了黑色烧损区域, 且持温时间越长, 烧损区域的面积越大, 表明表面损伤程度加剧。因此, 可通过黑色区域的分布和面积大小来评估试验梁的表面受损情况。在火灾温度为 800 °C 的条件下, 持温时间为 60 min 的试验梁未出现明显损伤, 混凝土表面仅存在少量黑色区域; 随着持温时间的延长, 黑色区域逐渐扩大。当持温时间达到 120 min 时, 黑色烧损区域已基本覆盖整个混凝土表面, 同时由于混凝土内部水分大量蒸发, 表面出现了白色条状物和斑点; 当持温时间延长至 180 min 时, 黑色区域完全覆盖混凝土表面, 颜色进一步加深, 白色条纹和斑点数量也明显增多。

2 温度场数值分析

温度场模型通过热对流和热辐射方式进行传热。受火面按照 ISO-834 国际标准升温曲线进行加热, 初始温度设定为 20 °C, 受火面的热对流交换系数设为 40 W/(m²·K), 综合辐射系数为 0.5; 背火面的热对流交换系数设为 20 W/(m²·K), 综合辐射系数为 0.7。图 6 为预应力混凝土 T 梁的有



编号: (a) PTL-60; (b) PTL-120; (c) PTL-180

试验点 1—1; 2—2; 3—3; 4—4; 5—5。

图 4 试验梁各测点温度曲线



编号: (a) PTL-0; (b) PTL-60; (c) PTL-120; (d) PTL-180

图 5 冷却后不同持温时长试验梁外观特征

有限元模型示意图。混凝土与钢筋的热传导系数均与温度相关, 具体关系如下。

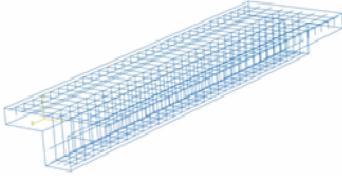


图 6 预应力混凝土 T 梁有限元模型

混凝土热传导系数 λ_c ^[6]:

$$\lambda_c = 1.72 - 1.72 \times 10^{-3} T + 7.16 \times 10^{-7} T^2 \quad (1)$$

式中: T 为受火温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

钢筋热传导系数 λ_s ^[7]:

$$\lambda_s = \begin{cases} 54 - 0.0333 T & 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \\ 27.3 & T > 800^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

混凝土与钢筋的比热随温度变化关系:

$$C_c = 900 - 4 \left(\frac{T}{120} \right)^2 + 80 \times \left(\frac{T}{120} \right) \quad 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq$$

1 200 $^{\circ}\text{C}$

(3)

$$C_s = 473 + 20.1 \times 10^{-2} T + 38.1 + 10^{-5} T^2 \quad (4)$$

式中: C_c 为混凝土比热容; C_s 为钢筋比热容^[8]。

3 结果与讨论

3.1 有限元模型验证

基于有限元软件 ABAQUS 建立火灾下预应力混凝土 T 梁的温度场模型, 试件参数设计如表 1 所示。

预应力混凝土 T 梁的温度场属于一个瞬态热传导过程。图 7 为试件在不同持温时间下的温度分布云图。由图 7 可知: 温度从受火面向试件内部和背火面逐渐传递, 呈现出明显的温度分层现象。随着恒温时间的延长, 预应力混凝土 T 梁腹部的高温区域逐渐增加, 翼缘板的低温区域则相应减少。同时, 试件的最高温度不断升高, 截面的受热损伤面积也随之扩大。

从预应力混凝土 T 梁温度场的结果文件中提取各结点的温度升温曲线, 并将其与受火时间为 180 min 的预应力混凝土 T 梁各测温点的实测温度

表 1 试件参数

| 编号 | 模型编号 | 混凝土保护层厚度/mm | 受火温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 受火时长/min |
|----|--------------|-------------|--------------------------|----------|
| 1 | PTL-25-6-60 | 25 | 600 | 60 |
| 2 | PTL-25-6-120 | 25 | 600 | 120 |
| 3 | PTL-25-6-180 | 25 | 600 | 180 |
| 4 | PTL-25-7-60 | 25 | 700 | 60 |
| 5 | PTL-25-7-120 | 25 | 700 | 120 |
| 6 | PTL-25-6-60 | 25 | 600 | 60 |
| 7 | PTL-25-6-120 | 25 | 600 | 120 |
| 8 | PTL-25-6-180 | 25 | 600 | 180 |
| 9 | PTL-25-7-60 | 25 | 700 | 60 |
| 10 | PTL-25-7-120 | 25 | 700 | 120 |
| 11 | PTL-25-6-60 | 25 | 600 | 60 |
| 12 | PTL-25-6-120 | 25 | 600 | 120 |
| 13 | PTL-25-6-180 | 25 | 600 | 180 |
| 14 | PTL-25-7-60 | 25 | 700 | 60 |
| 15 | PTL-30-7-180 | 30 | 700 | 180 |
| 16 | PTL-35-7-180 | 35 | 700 | 180 |
| 17 | PTL-40-7-180 | 40 | 700 | 180 |
| 18 | PTL-20-8-180 | 20 | 800 | 180 |
| 19 | PTL-30-8-180 | 30 | 800 | 180 |
| 20 | PTL-35-8-180 | 35 | 800 | 180 |
| 21 | PTL-40-8-180 | 40 | 800 | 180 |

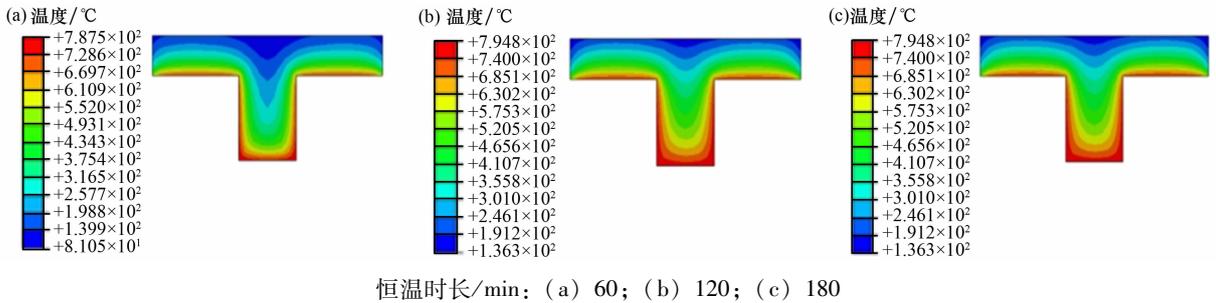
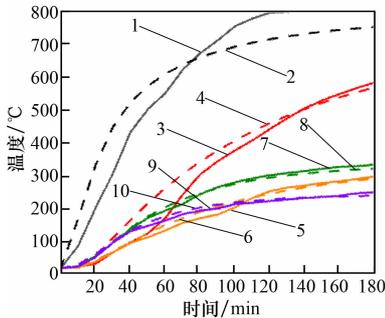


图 7 不同恒温时长预应力混凝土 T 梁的温度分布云图

值进行对比,结果如图 8 所示。由图 8 可知:各模拟点与试验点的温度时程曲线总体趋势基本一致,但在某些局部区域存在一定的偏差。产生这种差异的原因可能包括:有限元模拟过程中未考虑试件内部水分的蒸发效应;在实际试验中,试件出现了混凝土剥落和开裂现象,而有限元模拟未能对此进行模拟。



- 1—试验点 1; 2—模拟点 1; 3—试验点 2;
4—模拟点 2; 5—试验点 3; 6—模拟点 3;
7—试验点 4; 8—模拟点 4; 9—试验点 5;
10—模拟点 5。

图 8 试件截面温度对比

综上所述,本文所建立的预应力混凝土 T 梁温度场模型在参数设置、相互作用定义及网格划分等方面均较为合理。模型的计算结果与试验结果基本吻合,验证了模型的可靠性。因此可以基于该模型进一步开展有限元模拟分析工作。

3.2 不同条件下有限元模拟分析

为了更加细致、准确地了解预应力混凝土 T 梁的温度场分布情况,对比分析不同受火时间、受火温度以及混凝土保护层厚度条件下 T 梁底面和腹板两侧在受火作用下的温度场分布特征。为便于后续获取梁内部钢筋的高温时程曲线,在预应力混凝土 T 梁的跨中截面设置钢筋温度测点。具体布置如图 9 所示。

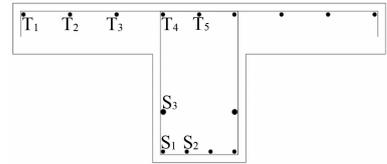
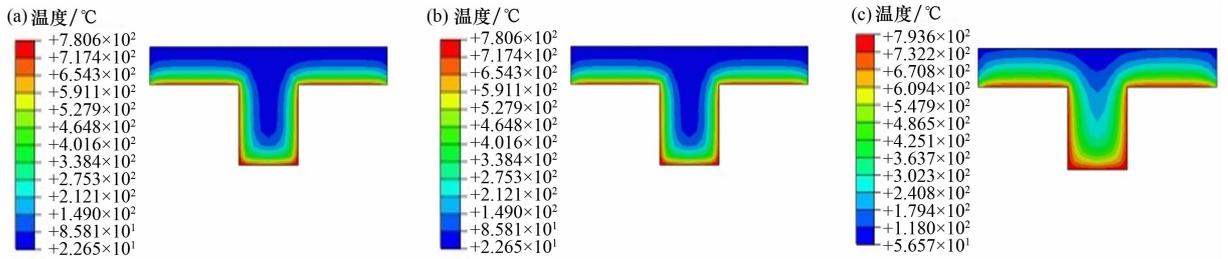


图 9 预应力混凝土 T 梁跨中截面温度测点布置

3.2.1 不同受火时间对 T 梁温度场分布的影响

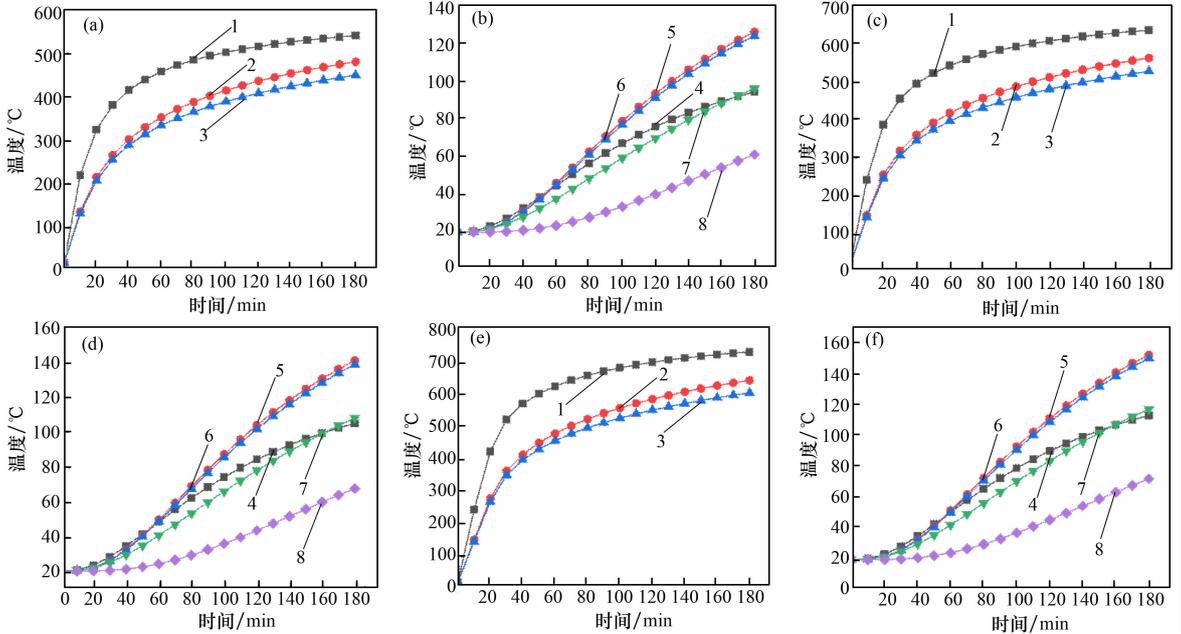
预应力混凝土 T 梁在经历 3 种不同受火时间的模拟后,其截面温度云图如图 10 所示。由图 10 可知:随着受火时间的延长,T 梁内部温度逐渐升高,且内部温差趋于减小。温度从受火面向构件内部和背火面传递,呈现出明显的温度分层现象。随着受火时间的增长,预应力混凝土 T 梁腹板区域的高温段逐渐扩大,而翼缘板区域的低温段相应减小。此外,T 梁翼缘板的温度梯度主要呈现纵向变化,而腹板的温度梯度则在横向和纵向均有变化,整体呈现出“U”型分布特征。翼缘板高温区域的面积占比小于腹板高温区域的面积占比。这是因为翼缘板仅下部受火,属于单面受火;而腹板底部和两侧均受火,属于三面受火状态,导致其受到多维热传导作用,从而使得截面温度上升更快,提高混凝土受损区域的占比。

图 11 为预应力混凝土 T 梁在不同火灾温度下各测点升温曲线。由图 11 可知:在火灾初期,预应力混凝土 T 梁腹板内钢筋的升温曲线趋于线性变化且增长迅速。随着时间的推移,其升温速率逐渐降低,在火灾 40 min 后,升温曲线趋于平缓。相比之下,位于 T 梁翼缘板内部的钢筋升温曲线前期的升温速率较慢,且整体升温幅度低于腹板内钢筋升温幅度。这是由于翼缘板内的钢筋距离受火面较远,而混凝土具有热惰性,导致混凝土内部不同钢筋测点温度存在差异。翼缘板内的测点 T_1 和 T_4 、 T_2 和 T_3 的升温曲线较为接近,这是由



编号: (a) PTL-25-6-60; (b) PTL-25-7-120; (c) PTL-25-8-180

图 10 不同受火时间 T 梁截面温度云图



编号: (a) PTL-25-6-180; (b) PTL-25-6-180; (c) PTL-25-7-180;

(d) PTL-25-7-180; (e) PTL-25-8-180; (f) PTL-25-8-180

1—S₁; 2—S₂; 3—S₃; 4—T₁; 5—T₂; 6—T₃; 7—T₄; 8—T₅。

图 11 预应力混凝土 T 梁在不同火灾温度下各测点升温曲线

于它们分别距离受火面的距离相等。测点 T₅ 位于腹板内部, 距离受火面最远, 因此其升温趋势最为平缓且接近直线, 进一步验证了混凝土的热惰性特征。由于 T 梁翼缘板为单面受火, 其内部的热量传导可视为一维热传导过程; 而腹板截面则受到横向和纵向两个方向的热量传递影响, 因此预应力混凝土 T 梁腹板的热传导可视为二维热传导过程。

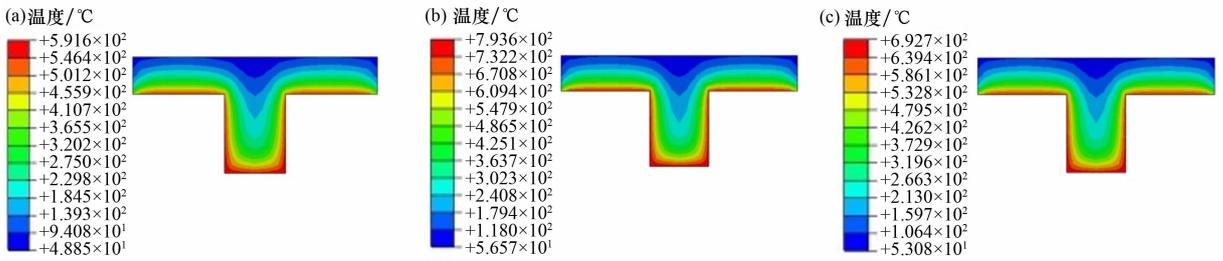
3.2.2 不同受火温度对 T 梁温度场分布的影响

图 12 为预应力混凝土 T 梁在不同受火温度下经过 3 h 受火模拟后跨中截面的温度云图。由图 12 可知: 在外部环境温度为 600 °C 的情况下, T 梁的最高温度达到了 592 °C; 当外部环境温度升至 700 °C 时, T 梁的最高温度达到了 693 °C; 而在

800 °C 的环境下, 其最高温度则达到了 794 °C。由此可见, 外部环境温度越高, T 梁受火面温度越接近环境温度, 且受到外部环境温度的影响也更为显著。

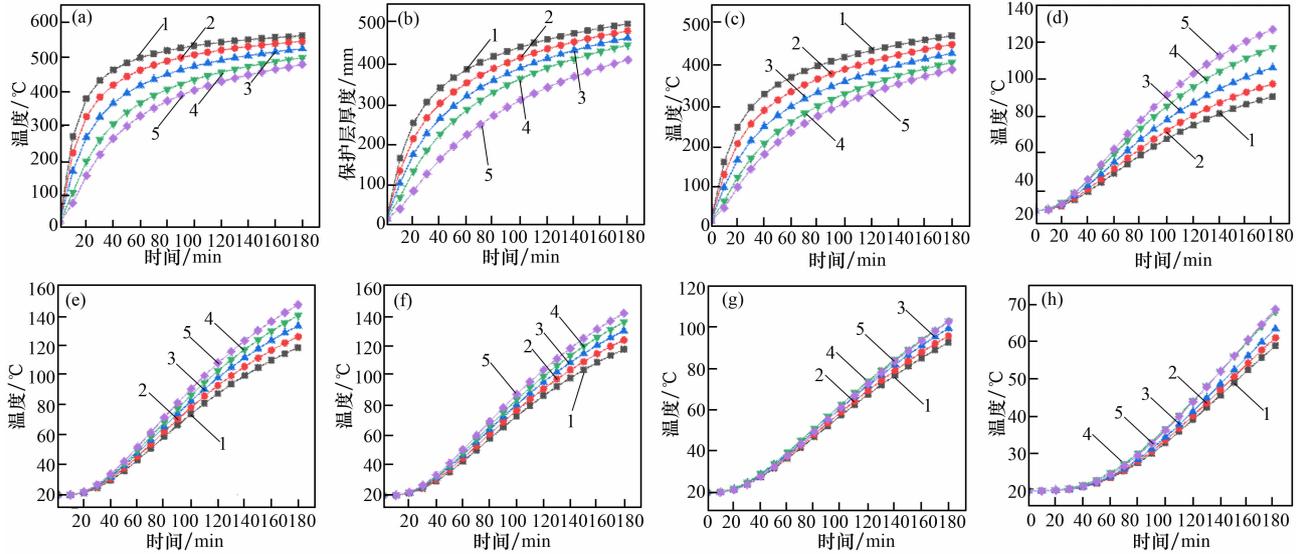
3.2.3 不同混凝土保护层厚度对 T 梁内部钢筋温度的影响

图 13 为在不同混凝土保护层厚度下, 预应力混凝土 T 梁腹板内钢筋的升温曲线。由图 13 可知: 在受火初期, 随着受火时间的增加, 不同保护层厚度的 T 梁腹板内部钢筋温度差逐渐增大; 而在受火 40 min 后, 其温度差随受火时间的进一步增加而减小。相比之下, 翼缘板内部钢筋的温度差一直随着时间的推移而逐渐增大。这是因为在腹板内部, 钢筋距离受火面较近, 温度上升速



编号: (a) PTL-25-6-180; (b) PTL-25-7-180; (c) PTL-25-8-180

图 12 不同受火温度 T 梁截面温度云图



编号: (a) S_1 ; (b) S_2 ; (c) S_3 ; (d) T_1 ; (e) T_2 ; (f) T_3 ; (g) T_4 ; (h) T_5

保护层厚度/mm: 1—20; 2—25; 3—30; 4—35; 5—40。

图 13 不同混凝土保护层厚度 T 梁跨中截面各测点升温曲线

率较快,且温度越高吸收的热量越多。因此,在受火后期,随着不同保护层厚度下钢筋温差的逐步减小,温度变化趋势趋于平缓。而翼缘板内部钢筋由于距离受火面较远,尚未达到极限温度,因此一直处于缓慢升温阶段,且升温速率较低。随着混凝土保护层厚度的增加,腹板内钢筋在相同时刻的温度有所降低。这是由于增加混凝土保护层厚度相当于使钢筋远离受火面,从而减小了火灾对钢筋的影响;而对于翼缘板钢筋来说,情况则相反。由于翼缘板仅下部受火,当增加上部受压区钢筋的保护层厚度时,实际上将钢筋位置下移,使得钢筋距离受火面更近,因此导致翼缘板内部钢筋温度随着保护层厚度的增加而升高。在相同混凝土保护层厚度条件下,钢筋之间的温度差基本保持一致,但在保护层厚度为 40 mm 的情况下,温度下降出现了突变现象。因此,在实

际工程中,对于有防火要求的建筑,建议将混凝土保护层厚度取为 40 mm 及以上。

4 结 论

(1) 在三面受火的条件下,随着受火时间的增加,T梁内部高温区域的面积越大,混凝土的损伤程度也越严重。T梁受火 1 h 后的最高温度为 780 °C,最低温度为 22 °C,内部温差达 758 °C;受火 2 h 后的最高温度为 790 °C,最低温度为 37 °C,内部温差为 753 °C;受火 3 h 后,最高温度为 793 °C,最低温度为 57 °C,内部温差为 736 °C。T梁内部的温差随着受火时间的延长而逐渐减小。翼缘板的高温区域占比低于腹板的高温区域,说明腹板内部钢筋混凝土受损程度大于翼缘板。

(2) 随着火灾环境温度的升高,T梁受火面

(下转第 47 页)

- 力吸收结构层沥青混合料设计及其性能研究[J]. 西部交通科技,2023(7):69-72.
- [4] 王家主,沈逸伦,钟培鑫. 常温洒(撒)布型极薄磨耗层在水泥混凝土路面的直铺应用效果[J]. 公路,2023,68(3):8-12.
- [5] 胡迪. 高速公路“白加黑”路面改造工程项目旧路处治方案比选研究[J]. 西部交通科技,2022(8):14-15;114.
- [6] FU X, HUANG J Y, BAN Y X, et al. Thickness ranges calculation method of double asphalt overlay on concrete pavement[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1):4939.
- [7] AZARI H, LIN S B. Evaluation of the impact echo method for concrete bridge decks with asphalt overlays[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019, 2673(2):436-444.
- [8] 王芳,王选仓,台电仓,等. 水泥混凝土加铺层贫混凝土基层荷载应力分析[J]. 公路,2008,53(7):135-139.
- [9] NG K, DAI Q I. Tailored extended finite-element model for predicting crack propagation and fracture properties within idealized and digital cementitious material samples[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 138(1):89-100.
- [10] LING J M, TAO Z F, QIAN J S, et al. Investigation the influences of geotextile on reducing the thermal reflective cracking using XFEM[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19(5):391-398.
- [11] 曹明明. 刚柔复合式基层沥青路面结构特征与荷载响应分析[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [12] 蔡燕霞. 橡胶沥青应力吸收层结构行为与路用性能研究[D]. 西安:长安大学,2016.
- [13] 金光来. 基于扩展有限元的沥青路面疲劳开裂行为的数值研究[D]. 南京:东南大学,2015.
- [14] 张兰峰. 基于移动荷载和连续变温条件下沥青路面结构力学响应研究[D]. 西安:长安大学,2018.
- [15] 职子涵. 基于连续-非连续理论的损伤结构力学响应数值模拟分析[D]. 郑州:郑州大学,2020.
- [16] 张攀. 基于改进 Paris 公式的沥青路面反射疲劳裂缝动态扩展研究[D]. 长沙:湖南大学,2019.
- [17] 谭振宁. 沥青路面横向开裂的数值模拟与结构优化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

(上接第40页)

的温度更接近外部环境温度,受外部温度的影响也更加显著。在环境温度分别为 600、700、800 °C 的情况下,T 梁的最高温度分别为 592、693、794 °C。T 梁内部钢筋的温度随着火灾温度的升高而增加,在不同受火温度条件下,随着时间的推移,同一钢筋不同位置之间的温度差逐渐趋近。

(3)随混凝土保护层厚度的增加,同一时刻钢筋的温度会相应降低,从而有利于减小钢筋的热损伤程度。当混凝土保护层厚度为 40 mm 时,钢筋温度下降的幅度出现明显变化,即存在一个转折点。因此,在实际工程中,对于有防火设计要求的建筑结构,建议适当增加混凝土保护层厚度,一般不应小于 40 mm。

参考文献:

- [1] 陆洲渊,徐朝晖. 火灾下钢筋混凝土柱温度场分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2004,32(9):1121-1125.
- [2] 刘桥,韩重庆,许清风. 高强钢筋混凝土连续 T 形梁受火后抗弯性能试验研究与数值分析[J]. 工程力学,2015,32(12):179-187.
- [3] 许肇峰,陈映贞,饶瑞. 火灾下混凝土空心板温度场及损伤规律研究[J]. 中国公路学报,2019,32(1):87-98.
- [4] 王玉钊,邱英,徐天贵,等. 火灾中钢筋混凝土两端固结梁破坏模式变化规律[J]. 防灾减灾工程学报,2024,44(1):192-201.
- [5] 王卫华,董毓利. 带楼板钢筋混凝土 T 形梁火灾下(后)温度场研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(2):684-693.
- [6] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [7] EN 1993-1-2; Eurocode 3: Design of steel structures-part 1-2: General rules - structural fire design. European Committee for Standardization (CEN)[S]. Brussels,2005.
- [8] 李引擎,马道贞,徐坚,等. 建筑结构防火设计计算和构造处理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1991.