

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201901052



改进热平衡法的燃油式火灾 试验炉模拟与分析

段进涛, 董毓利, 林剑青, 朱三凡

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为实现火灾动力学模拟(FDS)软件对火灾试验炉的模拟,以热平衡法为基础,在原燃油生成热计算公式中引入有效燃烧系数,使其适用于 FDS 对轻柴油燃烧的模拟;依据质量守恒原理,计算离炉烟气带走热量代替原来的经验公式计算法,进而提出基于改进热平衡法的 FDS 模拟火灾试验炉的方法.模拟结果表明:相较于热平衡法,改进热平衡法 FDS 可以更好地模拟火灾试验炉的燃烧过程,模拟平均炉温曲线和设定的 ISO-834 标准升温曲线吻合得更好.

关键词: 火灾试验炉; 热平衡法; 火灾动力学模拟; 火灾模拟; 改进热平衡法

中图分类号: O 357 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)04-0483-06

Simulation and Analysis of Fire Test Furnace Based on Improved Heat Balance Method

DUAN Jintao, DONG Yuli, LIN Jianqing, ZHU Sanfan

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to simulate the fire test furnace by fire dynamic simulation (FDS) software, based on the heat balance method, an improved heat balance method was proposed. Introducing the effective combustion coefficient into the original fuel generation heat calculation formula, the improved heat balance method is applied to the simulation of light diesel combustion by FDS, the heat removal from the furnace smoke was calculated according to the principle of mass conservation instead of the original empirical formula calculation method. The simulation results show that: compared with the heat balance method, the FDS can better simulate the combustion process of the fire test furnace according to the improved heat balance method. The simulation average furnace temperature curve agrees well with the ISO-834 standard temperature rise curve.

Keywords: fire test furnace; heat balance method; fire dynamic simulation; fire simulation; improved heat balance method

近年来,多起火灾事故引发的惨痛教训,使人们对火灾下建筑结构的安全性愈发关注,建筑结构的抗火性能和抗火设计逐渐成为学者的研究热点^[1]. 建筑结构抗火试验研究主要依靠火灾试验炉模拟真实室内火灾高温场景^[2]. 目前,国内很多高校和科研机构都建造了符合我国制定的《建筑构件耐火试验方法》的火灾试验炉^[3-6]. 从燃料种类上,这些火灾试验炉可以分为燃油火灾试验炉和燃气火灾试验炉. 早期建造的火灾试验炉大多使用轻柴油(0# 柴油)作为燃料对试验炉进行升温^[3-5],近年来新建的火灾

收稿日期: 2019-01-26

通信作者: 董毓利(1965-),男,教授,博士后,博士生导师,主要从事结构抗火的研究. E-mail: DongYL@hqu.edu.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778250)

试验炉普遍使用天然气作为燃料^[6-7]. 相对于柴油来说, 天然气不需要汽化过程, 可直接发生燃烧, 与空气混合更为充分, 这极大提高了天然气的燃烧效率, 因此, 天然气的燃烧效率普遍可以达到 98%^[7-8]. 此外, 柴油是易燃物, 在实验室内储存具有一定的危险性, 而天然气可以从市政燃气管道内随用随取. 随着计算机技术的发展, 火灾试验炉开始普遍采用基于实时炉温的模糊控制系统控制火炉的升温曲线^[9]. 这种火灾试验炉可以克服温度滞后干扰^[10], 炉温控制较为精确. 然而, 有些老式的燃油火灾试验炉^[11]和一些临时性的燃油火灾试验炉^[12-13]没有条件使用基于实时炉温的模糊控制系统控制炉温, 而是基于热平衡法^[11], 根据设定的炉温曲线计算得到每个时刻的轻柴油消耗速率, 通过控制燃料和空气供应控制炉温曲线. 这种基于热平衡法设计的燃油式火灾试验炉, 在实际应用中由于现实条件的差异, 火灾试验炉的实际炉温难以达到设定的炉温曲线^[12-13], 实际效果并不理想. 而火灾动力学模拟软件(FDS)作为常用的火灾模拟软件, 理论上可以实现火灾试验炉燃烧过程的模拟, 通过 FDS 模拟火灾试验炉, 可以事先验证火灾试验炉设计的效果, 同时, 还可以更加清楚地了解火灾试验炉的燃烧过程及炉内温度场变化. FDS 对火灾试验炉的模拟, 不仅可以为燃油式火灾试验炉设计提供帮助, 而且模拟得到的温度场数据也可以用于建筑结构的抗火研究^[14]. 但是如何采用 FDS 模拟火灾试验炉, 并确保火灾试验炉按照设定的升温曲线升温, 仍缺少相关理论及试验研究. 本文以热平衡法为基础, 结合 FDS 模拟火灾的原理, 提出改进的热平衡法.

1 改进热平衡法设计火灾试验炉

1.1 ISO-834 标准升温曲线

建筑结构抗火研究通常采用 ISO-834 标准升温曲线作为火灾温度场的升温曲线^[15], 火灾试验炉通常也按照 ISO-834 标准升温曲线进行设计^[16], ISO-834 标准升温曲线公式为

$$\theta = \theta_0 + 345 \cdot \lg(8t + 1).$$
 (1)

式(1)中: θ 为 t 时刻的温度, $^{\circ}\text{C}$; θ_0 为初始温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为时间, min .

ISO-834 标准升温曲线是学者根据大量实际建筑室内火灾实验总结出的升温曲线, 该曲线符合实际火灾温度场的升温过程. 火灾试验炉按照 ISO-834 标准升温曲线设计时, 虽然炉温可以达到真实火灾场景中的温度, 但是燃烧过程却与真实火灾过程并不完全相同.

为了充分利用燃料, 火灾试验炉会通过喷嘴提供足量的空气, 燃烧过程始终通过燃料控制. 而实际火灾中, 在火灾初期阶段, 新鲜空气充足, 火灾由燃料控制, 可燃气体聚集到一定阶段会发生“轰燃”现象, “轰燃”促使温度快速上升, 室内火势蔓延迅速, 火灾的局部燃烧会过渡到全室燃烧; 在火灾充分发展阶段, 氧气消耗量巨大, 火场内部会出现供氧不足的情况, 这时的燃烧主要由通风控制, 室内火灾温度上升速度逐渐减缓, 可以达到 $1\ 100\ ^{\circ}\text{C}$ 左右.

1.2 热平衡法

1.2.1 热平衡法原理 热平衡法根据能量守恒原理设计火灾试验炉, 火炉在任意时刻都处于热平衡状态. 在火灾试验炉中, 热量的产生主要是由燃料燃烧生成的化学热, 热量的流失主要是墙壁吸收的热量和烟气带走的热量. 所以, 燃料燃烧生成的热量 Q_1 等于墙壁吸收的热量 Q_2 和烟气带走的热量 Q_3 之和. 在任意时刻, 分别计算 Q_1 , Q_2 和 Q_3 , 建立热平衡方程 $Q_1 = Q_2 + Q_3$, 计算某一时刻的温度, 取对应的 ISO-834 标准升温曲线在该时刻的温度, 解此方程, 即可得到当炉温按照 ISO-834 标准升温曲线升温时的轻柴油消耗速率.

1.2.2 燃料燃烧生成热量 Q_1 燃油火灾试验炉内升温的热量来源是轻柴油燃烧生成的热量, 其计算公式为

$$Q_1 = B \cdot Q_{\text{yd}}.$$
 (2)

式(2)中: B 为燃油消耗速率, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$; Q_{yd} 为燃油燃烧热, 一般取 $41.868\ \text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1.2.3 炉壁吸收热量 Q_2 在火灾试验炉中, 当升温曲线按照 ISO-834 曲线进行升温时, 试验炉通过炉壁(炉墙、底板和顶板)向外散发热量的过程为不稳态过程. 炉壁不稳态散热过程的理论计算方法较为复杂, 且火灾试验炉需要研究的是炉内温度, 而不需要计算炉壁温度, 为简化计算通常采用近似公式法. 研

究表明,当傅里叶准数 $F < 0.4$ 时,可采用《工业炉设计手册》^[17]推荐的近似公式,计算炉墙不稳态散热,相对于有限差分法,近似公式计算结果的误差在 5% 内^[11]. 傅里叶准数 F 的表达式为

$$F = a \cdot t / h^2.$$

(3)

式(3)中: a 为导温系数, $a = \lambda / (\rho c)$,其中, λ 为炉壁的热传导系数, c 为炉壁比热容, ρ 为炉壁密度; t 为火灾已持续时间,取常见建筑结构试验时长 4 h; h 为炉壁厚度,取一块砖的长度 0.24 m.

火灾试验炉的炉墙、底板和顶板的材料热工参数,如表 1 所示. λ, c, ρ 均依据表 1 取值,通过公式计算得到 $F = 0.12$,小于 0.4,所以,可以采用近似公式计算炉壁不稳态散热过程.

表 1 材料热工参数

Tab. 1 Thermal parameters of materials

材料	$\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\lambda / \text{kJ} \cdot (\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	$c / \text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	$a / \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$
粘土砖	1 700~1 800	2. 918	0. 879	0. 001 8~0. 001 9
混凝土	2 200~2 500	5. 581	0. 842	0. 002 7~0. 003 0

炉墙、顶板、底板吸收热量的热流密度近似计算式为

$$q_n = \frac{0.95 \cdot b \cdot \Delta\theta}{\sqrt{t}}.$$

(4)

式(4)中: q_n 为炉壁不稳态散热热流密度; b 为热惰性系数, $b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$; $\Delta\theta$ 为温差; t 为加热时间.

炉墙、顶板、底板吸收热量 Q_2 的计算式为

$$Q_2 = S_{2w} \cdot q_{2w} + S_{2c} \cdot q_{2c}.$$

(5)

式(5)中: S_{2w} 为火炉内炉墙的面积; q_{2w} 为火炉炉墙散热的热流密度; S_{2c} 为火炉内顶板、底板的面积; q_{2c} 为炉墙散热的热流密度.

1.2.4 离炉烟气带走热量 Q_3 在热平衡法中,烟气带走热量 Q_3 的计算式为

$$Q_3 = (1 - k) \cdot B \cdot V_a \cdot C_y \cdot \Delta\theta.$$

(6)

式(6)中: k 为机械不完全燃烧损失率,轻柴油取 0.01; V_a 为单位燃料生成的烟气量,根据经验取 $12.15 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; C_y 为离炉烟气平均比热容,取 $1.098 6 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$.

1.3 改进热平衡法

改进热平衡法主要是结合 FDS 的特点,对热平衡法中无法准确描述 FDS 模拟的计算分项进行改进,主要包括 2 部分内容:在燃料燃烧生成的热量 Q_1 计算式中引入有效燃烧系数 α ;依据质量守恒定律计算烟气带走的热量 Q_3 .

热平衡法认为,在火灾过程中,轻柴油始终充分燃烧,但在实际燃烧过程中,轻柴油的燃烧需要经历液体-雾化-汽化-燃烧的过程,很难充分燃烧,甚至在火炉内部分轻柴油未发生燃烧就随烟气排出火炉,所以,轻柴油实际燃烧生成的热量要比公式计算的结果略低.在原计算式的基础上,引入有效燃烧系数 α ,在氧气充足和燃烧喷嘴的雾化效率确定的情况下,通过 FDS 软件的试算可知, α 和温度成正相关,在 $20 \sim 1\,200\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, α 可取 $0.80 \sim 0.96$.改进后的公式可表示为

$$Q_1 = B \cdot Q_{yd} \cdot \alpha.$$

(7)

在热平衡法中,烟气带走热量是通过计算离炉烟气的体积与离炉烟气的平均热容量和温差三者之积得到的.但是,由于燃烧生成的烟气的体积会随温度变化而发生较大的变化^[18],从 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $1\,200\text{ }^\circ\text{C}$ 的过程中,烟气会膨胀几倍,所以,使用离炉烟气的平均热容量计算烟气带走热量会有较大的误差.而根据质量守恒原理,进入火炉的轻柴油质量和空气质量之和等于排出炉体的烟气质量,质量守恒原理不会受到温度的影响.因此,采用质量守恒的方法,计算烟气带走热量 Q_3 ,结果会更加准确.排出炉体的烟气质量等于喷入炉体的轻柴油质量和空气质量之和.排出炉体的烟气带走热量 Q_3 可以表示为

$$Q_3 = B \cdot (\alpha + 1) \cdot C_y \cdot \Delta\theta.$$

(8)

2 实例验证与分析

以目前常见的水平火灾试验炉为例,根据热平衡法和文中提出的改进热平衡法,分别计算 4 h 内火灾试验炉按照 ISO-834 标准升温曲线升温的轻柴油的消耗速率;使用 FDS 分别模拟 2 种轻柴油消耗速

率下火灾试验炉内的燃烧过程,采集火炉内的温度场数据进行对比分析.水平火灾试验炉内部空间尺寸一般为 6.0 m(长)×4.2 m(宽)×1.6 m(高),四周炉墙为耐火砖墙,底部通常为混凝土地面加耐火砖,顶部一般放置火灾试验对象(板梁构件或结构体),柱体一般放在垂直炉内进行试验,水平炉顶部空出区域用盖板进行封堵,可以近似地认为顶部盖板为混凝土材质.在长边炉墙上布置 6 个喷嘴,一侧短边炉墙上设置排烟孔道,考虑到热烟气一般向上流动,在底部设置排烟孔道,排烟孔大小为 0.4 m×0.4 m.火灾试验炉结构,如图 1 所示.利用热平衡法和改进热平衡法,根据实际炉体参数和 ISO-834 标准升温曲线,分别计算轻柴油消耗速率随时间的变化,结果如图 2 所示.

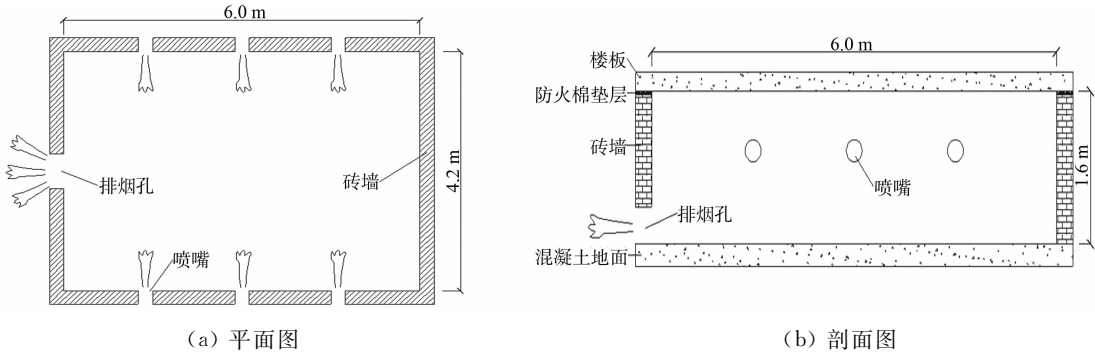


图 1 火灾试验炉结构
Fig. 1 Structure of fire test furnace

由图 2 可知:在火灾初期阶段,温度上升较快,单位时间内火炉消耗的轻柴油量较大.当时间很短时,轻柴油消耗速率会接近于无限大,主要是因为炉墙不稳态散热流密度 q_n 采用近似公式(4)计算,在火灾前期阶段时间 t 很小时, q_n 会趋于无穷大,即炉墙散热会达到无穷大,这与实际情况不符.为了避免近似公式在时间很小时产生的误差,王广军等^[11]和王勇^[12]在试验中都建议取 30 min 时的燃油消耗速率作为火灾试验炉前期的供油速率,但是实际效果并不理想.在文献[12]的试验中,火炉的平均炉温无法按照 ISO-834 标准升温曲线进行升温,最大温差达到 500 ℃左右,其平均炉温曲线与 ISO-834 标准升温曲线的对比,如图 3 所示.

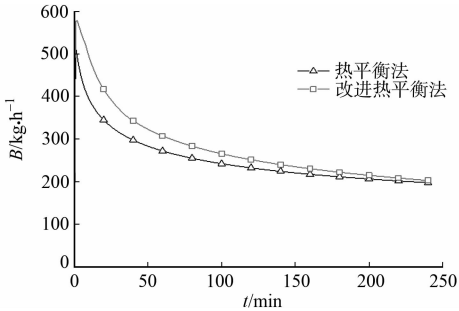


图 2 轻柴油消耗速率随时间的变化
Fig. 2 Variation of light diesel oil consumption rate with time

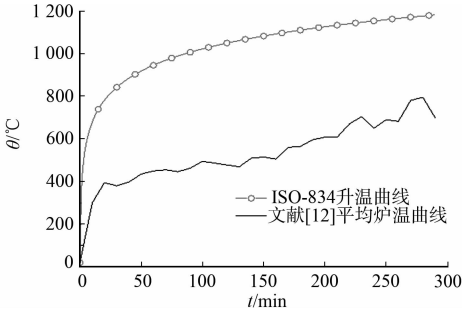


图 3 文献[12]炉温曲线与 ISO-834 升温曲线的对比
Fig. 3 Comparison of temperature curves between reference [12] and ISO-834

为了确定火灾试验炉升温初期轻柴油消耗速率随时间的变化关系,采用热平衡法^[11]和文中提出的改进热平衡法,分别计算 30,15,8,4,2 min 时的燃油消耗速率,将其作为初期供油速率,并使用 FDS 模拟火灾试验炉燃烧 1 h,将模拟得到的平均炉温曲线与 ISO-834 标准升温曲线进行对比,如图 4 所示.

由图 4 可知:热平衡法取 2 min 时的轻柴油消耗速率作为前期供油速率,平均温度场虽然可以控制得比较好,但后期温度场与 ISO-834 标准升温曲线相差越来越大;改进热平衡法取 4 min 时的轻柴油消耗速率作为前期供油速率,平均温度场可以控制得较好,得到的炉温曲线接近 ISO-834 标准升温曲线.

根据图 4 结果,热平衡法取 2 min 时的燃油消耗速率作为前期供油速率,改进热平衡法取 4 min 时的燃油消耗速率作为前期供油速率,在该时刻之后,供油速率按照计算结果取值,使用 FDS 分别模拟火灾试验炉燃烧 4 h.对比这两种方法模拟火灾试验炉的平均炉温曲线,如图 5 所示.由图 5 可知:基于改进热平衡法,采用 FDS 模拟火灾试验炉的平均炉温与 ISO-834 标准升温曲线吻合得较好.

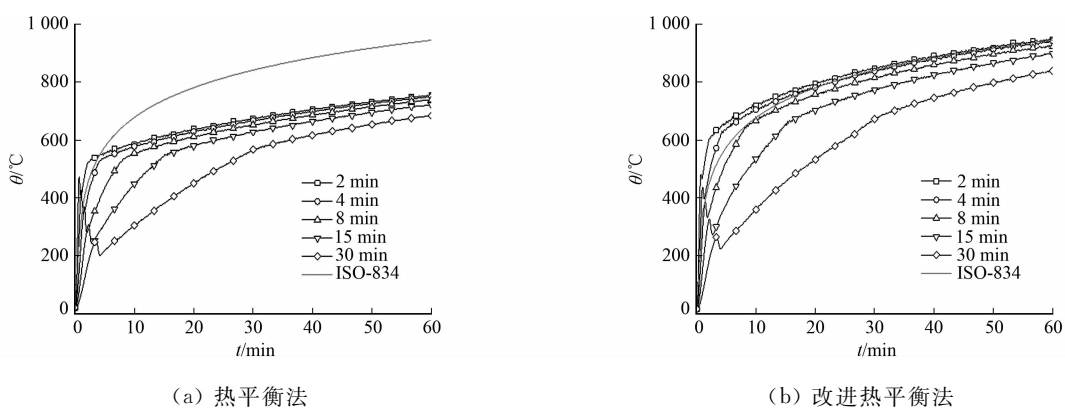


图 4 不同供油速率下的平均炉温曲线对比

Fig. 4 Comparison of average furnace temperature at different fuel supply rates

为进一步验证基于改进热平衡法的 FDS 模拟火灾试验炉的有效性,从 FDS 模拟结果中,分别提取炉墙和顶、底板吸收热量、烟气带走热量、轻柴油燃烧生成热量与改进热平衡法的计算值进行对比,结果如图 6 所示。

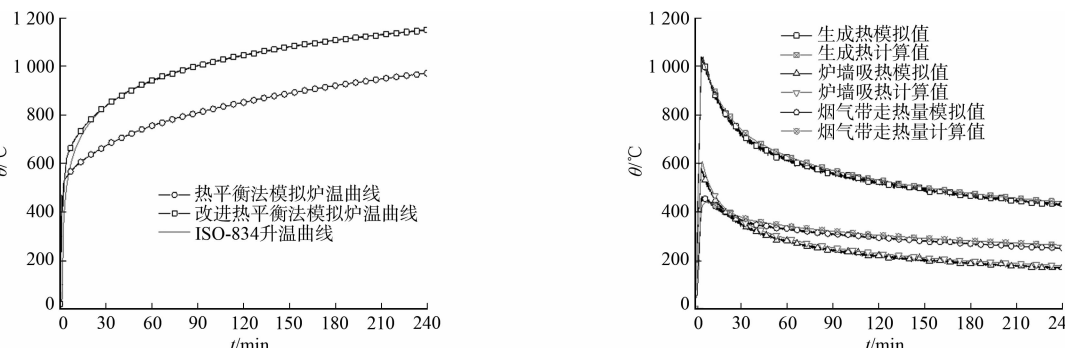


图 5 两种方法的平均炉温曲线对比

Fig. 5 Comparison of average furnace temperature by two methods

图 6 各项热功率的模拟值与计算值的对比

Fig. 6 Comparison between simulation and calculation values of various thermal powers

由图 6 可知:采用改进热平衡法得到的炉墙和顶、底板吸收的热量、烟气带走的热量、轻柴油燃烧生成热量的计算值与 FDS 模拟的结果基本吻合;只在火灾初期阶段,由于“轰燃”现象的存在,导致计算结果和实际情况之间存在一定的误差。究其原因是热平衡法无法考虑火灾的“轰燃”现象对火灾试验炉的影响。但“轰燃”现象只存在火灾发展的初期阶段,且时间很短,不影响后期火灾试验炉的温度场,故基于改进热平衡法可准确地模拟火灾试验炉的燃烧过程,平均炉温曲线与设定的 ISO-834 标准升温曲线基本吻合。

相较于真实火灾试验炉,FDS 模拟可以在火灾试验炉内测得更多的数据和物理参数,且布置测点也无需考虑现实条件的约束。因此,可以在 FDS 模拟火灾试验炉内布置大量的热电偶测点,研究火炉内的温度场分布情况和烟气流动情况。在火炉的中心位置分层布置热电偶测点,与混凝土地面的距离分别为 0.2,0.4,0.6,0.8,1.0,1.2,1.4 m,提取 0.2 m(炉体底部)、0.8 m(炉体中间)、1.2 m(炉体顶部)3 点处的温度曲线进行对比,如图 7 所示。

由图 7 可知:炉体中间处的温度最高,而靠近底板处的温度最低。这是因为炉体中间处正对着燃烧火焰喷嘴,所以温度较高;又由于热烟气向上流动,所以炉体上部的温度高于下部。80 min 后,火炉内上、下空间的温度逐渐趋于一致,温度场分布较为均匀,说明火灾试验炉内温度场基本均匀,同时可知,火灾试验炉的排烟孔设置在底部可以使高温烟气实现有利循环,提高热效率。

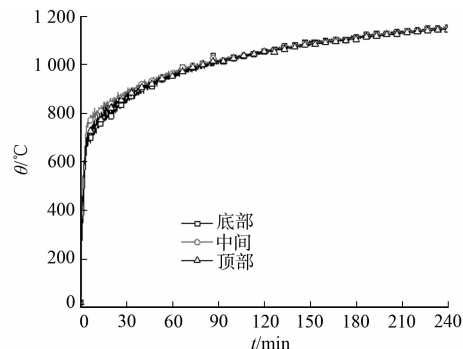


图 7 各测点升温曲线的对比

Fig. 7 Temperature curve of each thermocouple

3 结 论

为了实现 FDS 对火灾试验炉的模拟,以热平衡法为基础,提出改进热平衡法;计算当火灾试验炉按照 ISO-834 标准升温曲线升温过程中任意时刻消耗轻柴油的质量,以改进热平衡法计算的结果作为 FDS 的供油参数,模拟火灾试验炉,得到以下 3 个结论.

1) 采用引入有效燃烧系数 α 的改进热平衡法,计算轻柴油燃烧时所释放的热量与 FDS 模拟结果更加吻合.

2) 根据质量守恒定律计算离炉烟气带走热量,可以消除由于升温导致烟气膨胀产生的误差,计算结果与 FDS 模拟结果相吻合.

3) 根据改进热平衡法,可以实现 FDS 对火灾试验炉的模拟,模拟炉温曲线符合 ISO-834 标准升温曲线.通过 FDS 对火灾试验炉的模拟,可以为燃油式火灾试验炉的设计和炉温控制提供参考,也为建筑结构抗火研究及模拟提供更准确的温度场数据.

参考文献:

[1] 傅传国,王广勇.钢筋混凝土框架结构火灾行为试验研究和理论分析[M].北京:科学出版社,2016.

[2] 任晓虎,霍静思,曾翔,等.一种采用可控复合技术的新型升温炉[J].自然灾害学报,2012,21(3):230-235. DOI:10.13577/j.jnd.2012.0333.

[3] 李晓东,董毓利,刘杰.燃油火灾试验炉的研制[J].青岛建筑工程学院学报,2004,25(2):12-14. DOI:10.3969/j.issn.1673-4602.2004.02.003.

[4] 郑文忠,侯晓萌,闫凯.预应力混凝土高温性能及抗火设计[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2012.

[5] 张大山,董毓利,朱崇绩.大尺度钢筋混凝土双向板的受拉薄膜效应分析[J].东南大学学报(自然科学版),2012,42(5):956-961. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2012.05.029.

[6] 徐明,高建勋.水平模拟火灾试验炉的研制[J].实验技术与管理,2009,26(11):49-51. DOI:10.3969/j.issn.1002-4956.2009.11.015.

[7] 徐通模.燃烧学[M].北京:机械工业出版社,2011.

[8] 岑可法.高等燃烧学[M].杭州:浙江大学出版社,2002.

[9] 李明弟,李强,孙一民,等.模糊控制在火灾试验炉中的应用[J].实验技术与管理,2009,26(2):55-57. DOI:10.3969/j.issn.1002-4956.2009.02.017.

[10] 李明弟,刘学亭,李强,等.大型火灾试验炉研制与应用[J].实验室研究与探索,2008,27(7):31-33. DOI:10.3969/j.issn.1006-7167.2008.07.010.

[11] 王广军,边庆策,史毅,等.建筑构件耐火性能试验炉的研制与应用[J].建筑科学,1996(2):29-35. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.1996.02.006.

[12] 王勇.钢框架结构中 2×2 区格连续混凝土板抗火性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

[13] 李兵.混凝土板受火性能分析及整体结构中连续板抗火试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.

[14] 段进涛,史旦达,汪金辉,等.火灾环境下钢结构响应行为的 FDS-ABAQUS 热力耦合方法研究[J].工程力学,2017,34(2):197-206. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2016.01.0061.

[15] 熊平,王升,文桃.双圆夹层钢管混凝土的组合弹性模量理论[J].华侨大学学报(自然科学版),2019,40(1):48-55. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201808002.

[16] 林碧兰,李丹,徐玉野.三面受火后混凝土短柱受剪承载力的数值计算[J].华侨大学学报(自然科学版),2014,35(4):437-442. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.04.0437.

[17] 王秉铨.工业炉设计手册[M].北京:机械工业出版社,2010.

[18] 何妞.热膨胀烟气再循环联合系统在流化床锅炉中的应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)