

混凝土受火试件瞬态热分析计算机仿真研究

朱新建

武汉理工大学土木与建筑工程学院, 湖北武汉 (430070)

E-mail: shandong@163.com

摘要: 应用瞬态温度场仿真程序 ANSYS 对四面受火方柱截面温度场进行了模拟分析。综合考虑材料的导热系数、质量热容及适当的时间步、荷载步等因素的影响, 从而得出了合理的温度场模拟结果。为设计及评估结构高温受损后的安全性和耐久性提供了参考依据。

关键词: 混凝土; 火灾; 瞬态热分析; 温度场; ANSYS

中国分类号: TU5

1. 引言

评估火灾后混凝土试件力学性能的方法主要有有限元法和修正传统法^[1-3]两类。采用有限元法时, 首先利用相关的理论^[4]获得试件表面和内部的最高温度分布, 进而根据高温后的混凝土应力应变关系本构模型, 计算火灾后试件的力学性能。采用传统修正法时, 仍然遵循常温下试件力学性能的简化计算理论, 但此时混凝土的热工参数均以高温后的数值取代, 故计算误差较大。

由于利用相关理论^[4]来计算混凝土表面、内部最高温度时的复杂性, 本文以一混凝土方柱为例, 主要研究利用 ANSYS 软件实现混凝土方柱四面受火高温状态时结构的温度场全程仿真计算, 得到和试验结果较为一致的各时段的温度场, 为设计以及评估结构在高温受损后的安全性和耐久性提供参考依据。

2. 混凝土瞬态热分析仿真计算原理及模型

2.1 仿真计算原理

ANSYS 热分析基于能量守恒原理的热平衡方程。结构的高温力学反应在通常情况下不会改变其既有的温度分布。只有当结构混凝土出现很宽的裂缝时, 热气流的侵入才能造成很小范围内的局部温度变化。故仿真计算时, 假定混凝土为各向同性材料, 既不考虑截面上钢筋面积的影响, 也不计及混凝土开裂或表面崩脱后的截面局部变化所引起的温度重分布。

由于火灾的温度随时间而变化, 材料的热工参数随温度(时间)而变化, 因此结构温度场分析成为一个非线性的瞬态热传导问题。可采用如下瞬态热传导的基本微分方程^[4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \frac{q_d}{c\rho} \quad (1)$$

式中, T 为混凝土内的温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为时间, h ; c 为质量热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; ρ 为混凝土密度, 取常值 $2400\text{kg}/\text{m}^3$; λ 为热导率或导热系数, $\text{J}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$; q_d 为混凝土单位体积单位时间内发出的热量, 通常情况下, 对结构高温(火灾)分析时不考虑混凝土本身的发热, 可取 $q_d = 0$ 。

上式适用于任何三维结构。对工程中最常见的梁、柱等杆系试件, 一般假定沿试件轴线的温度相同, 可简化为沿截面的二维温度场。柱结构的二维热传导基本方程^[4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] \quad (2)$$

2.2 瞬态热传导方程的求解方法

方程式 (2) 的求解, 除了要获知材料的热工参数外, 还需确定结构的初始条件和边界条件。

火灾开始前, 结构物多处于环境温度状态。可假设整个结构的温度均匀, 且等于环境温度 T_0 , 故初始条件可写作:

$$T_{(x,y,z,t=0)} = T_0 \quad (3)$$

结构物遭受火灾后, 随着火灾的延续、温度的升高, 结构受火面的温度值逐渐接近火灾气流的温度值。又根据国际标准化组织 (ISO864) 建议的火灾标准升温曲线^[4], 边界条件可按已知结构边界 (l_1) 上的温度是时间 (t) 的函数, 即:

$$T_{(x,y,z,t)} \Big|_{l_1} = T_f(t) \quad (4)$$

2.3 二维有限元计算模型

采用有限元方法, 即对结构空间域用有限单元进行离散, 在时间 (温度) 域上用差分的步进法递推分析。由于单元的数目是有限的, 节点的数目也是有限的, 所以称为有限元法^[5]。

瞬态热分析中的载荷是只随时间变化的, 为了表达随时间变化的载荷, 首先必须将载荷—时间曲线分为载荷步。载荷—时间曲线中的每一个拐点为一载荷步^[6]。如图 1 所示。对于每一个载荷步, 必须定义载荷值及时间值, 同时选择载荷步为渐变, 以适应非线性迭代的需要。

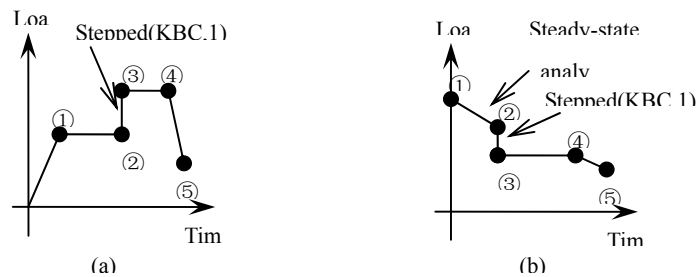


图 1 载荷—时间曲线中载荷步示意

Fig1 schematic drawing in line of load and time

方柱受灾模型应从整个过程考虑混凝土结构的性能, 选用 Thermal Solid 中的 Quad 8node 77 单元。计算模型及网格划分见下图 2, 以一混凝土方柱为例。柱截面尺寸为 300mm×300mm, 柱外空间为 3000mm×3000mm 的火灾场, 因柱截面形状和边界条件都是两个对称轴, 故可取截面的 1/4 进行温度场分析。为了更直观, 选用整体空间为模型。

3. 计算参数的选取

3.1 火灾标准升温曲线

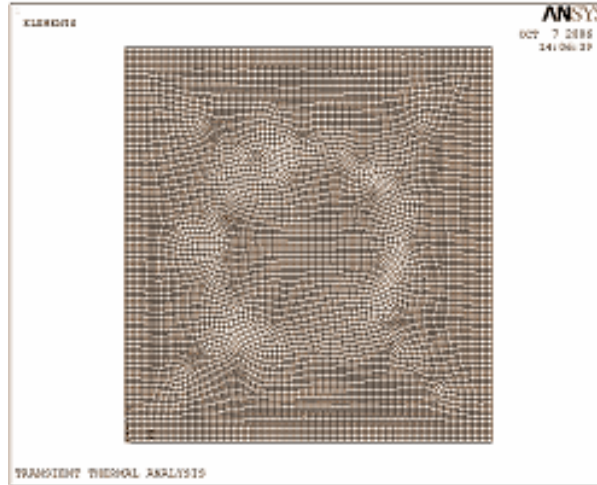


图2 基本模型及网格划分
Fig2 Basic model and grid division

采用国际标准化组织（ISO834）建议的标准温度—时间曲线，其计算式如下^[4]。火灾的延烧时间取为 30, 60, 90, 120 等 4 档。

$$T = T_0 + 345 \lg(8t + 1) \quad (5)$$

式中， T_0 ——试件所在环境下的初始温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

T ——燃烧开始后 t 分钟时试件环境内的空气平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

3.2 热导率或导热系数

其定义为单位时间（h）内、在单位温度梯度（K/m）情况下，通过材料单位等温面积（ m^2 ）热量（J），单位为 $\text{J}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。采用如下公式计算^[7]：

$$20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_c = 2 - 0.24\left(\frac{T}{120}\right) + 0.012\left(\frac{T}{120}\right)^2 \quad (6)$$

式中， T ——试件单元的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

3.3 质量热容

其定义为单位质量（kg）的材料，当温度升高 1°C 所需吸入的热量（J），单位为 $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。可采用如下公式计算^[7]：

$$20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad c_c = 900 + 80\left(\frac{T}{120}\right) - 4\left(\frac{T}{120}\right)^2 \quad (7)$$

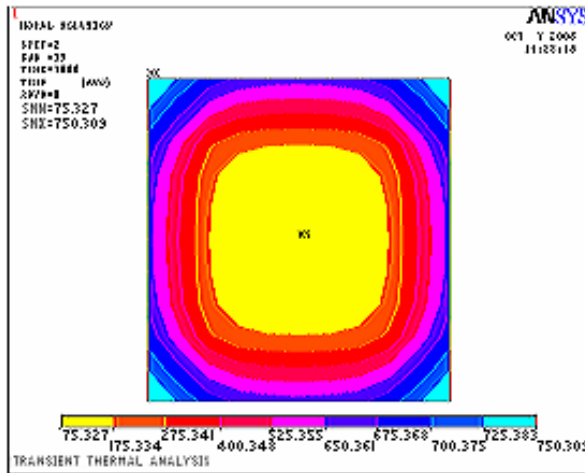
式中， T ——试件单元的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

4. 计算机仿真分析

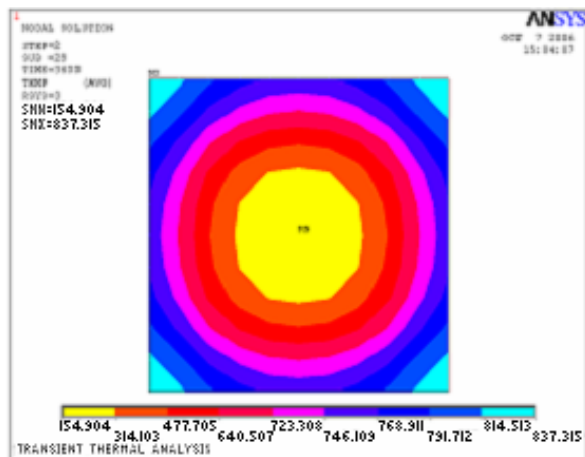
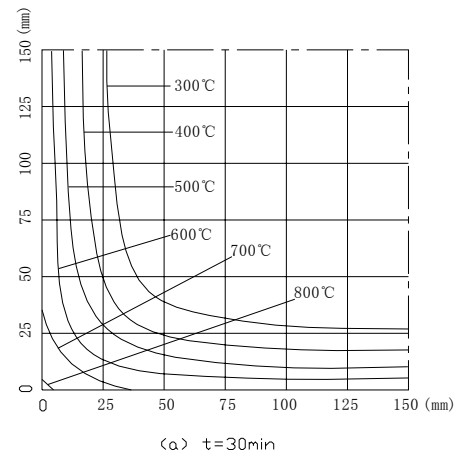
利用 ANSYS 软件的单元生死功能模拟整个火灾过程。整个模型建好后，因为火灾的升温随着时间的变化而变化，故先将火灾单元全部杀死，再按时间差分的步进法，采用 15min 步长进行激活，并采用下一步的初始温度进行温度传导。

又因混凝土的质量热容、热传导率等材料特性都随着混凝土的温度的变化而变化，因此计算时混凝土单元升温取 50℃为一步长，结合单元时间和温度来变换一种材料以反映材料性能的变化，求解出温度场。

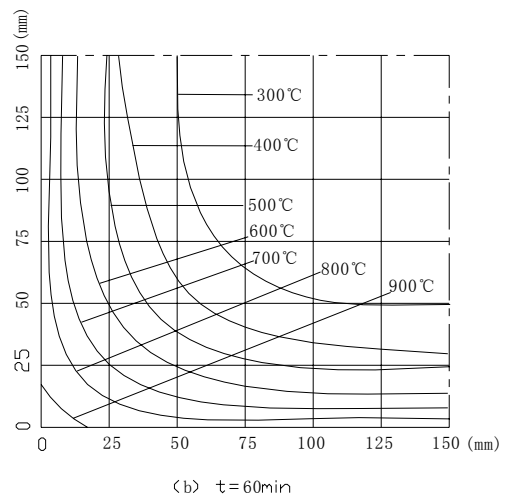
基于上述方法，考虑了混凝土的热工参数随温度变化等情况，就能得到比较合理的计算温度场分布彩色云图。如下：

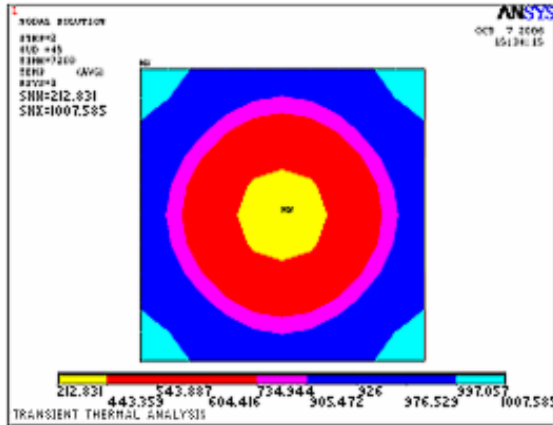


(A)



(B)



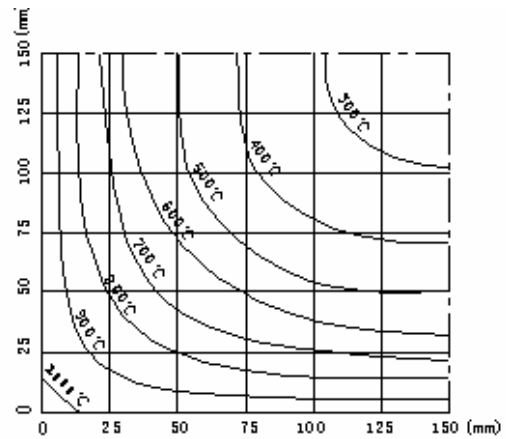


(C)

图3 混凝土截面各时刻温度场彩色云图

(A)t=30min (B)t=60min (C)t=120min

Fig3 Temperature field chart of section various times



(c) t=120min

图4 混凝土（300×300）截面各时刻等温线

(a)t=30min (b)t=60min (c)t=120min

Fig4 Uniform temperature line of section various times

5. 成果分析

通过计算机仿真结果与文献^[4]提供的四面受火方柱（300mm×300mm）截面的等温曲线进行对比，不难得知：

A：计算机仿真得出的结果都偏小，原因是我们进行模拟计算时，因火灾时间步长的选取偏大，每一步时间内，火灾温度有升高的变化，故而影响了柱截面内的温度值。

B：计算机仿真结果与文献提供的试验结果的图形曲线却是一致的；同时，我们也对120min进行了模拟，从而验证了计算机仿真的结果的正确性与通用性。

6. 结语

A：采用大型通用有限元软件 ANSYS 仿真计算混凝土受火灾时的温度场是可行的。

B：适当选取时间步长与荷载步长，将能更精确地反映混凝土受火灾时的温度场分布。

参考文献

- [1] T.T.Lie, A Procedure to Calculate the Fire Resistance of Structural Members[J], International Seminar on Three Decades of Structural Fire Safety, pp.139-153, February 1983
- [2] S.Timoshenko, J.Gere.Mechanics of Materials.Van Nostrand Reinhold Company[J], pp.25-261972
- [3] 朱伯龙, 董振祥.钢筋混凝土非线性分析[M].上海: 同济大学出版社, 1986
- [4] 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, 2003.1
- [5] 嘉木工作室.ANSYS5.7 有限元实例分析教程.北京: 机械工业出版社, 2002.3
- [6] 王国强.实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践.西安: 西北工业大学出版社, 1999
- [7] Commission of the European Communities.Eurocode No.2,Design of Concrete Structures[J].Part10;Structural Fire Design.April 1990

Simulated research of concrete transient thermal analysis by fire on computer

Zhu Xinjian

College of Construction and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan (430070)

Abstract

Simulation analysis of square concrete pillar on accepting the fire all round is applied the transient temperature emulated ANSYS proceduer.Synthesizing the factor effect such as the heat conduction modulus and contain of Mass heat、appropriate time step、load step,has reached the rational temperature thereby simulating result. To designing and appraising structure security and durability have been provided the reference basis.

Keywords: concrete,fire; transient thermal analysis; temperature field; ANSYS