

火灾下

建筑构件内温度场数值模拟基础

刘永军 著



科学出版社
www.sciencep.com

国家自然科学基金重大国际合作项目 (编号: 50320120156)

辽宁省教育厅重大基础 Research 计划项目 (编号: 2004C065)

资助

沈阳建筑大学学术专著出版基金

火灾下建筑构件内 温度场数值模拟基础

刘永军 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以作者开发的火灾下建筑构件内温度场数值模拟软件为例,详细介绍了火灾下建筑构件内温度场数值模拟所涉及的基础知识,包括传热学理论、有限元理论、Visual Basic6.0、有限元程序设计方法、二维单元和三维单元的开发、前处理技术、后处理技术等,的是使读者阅读后能够开发出具有良好前后处理系统的温度场数值模拟软件。本书内容相对完整,并给出了用 Visual Basic 6.0 编写的主要源程序。

本书可供土木工程、安全工程、防灾减灾工程及防护工程、工程热物理、机械工程等学科(专业)的大学生、研究生、教师以及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

火灾下建筑构件内温度场数值模拟基础/刘永军著. —北京:科学出版社, 2006

ISBN 7-03-017047-4

I. 火… II. 刘… III. 建筑结构-结构构件-火灾-温度场-计算机仿真 IV. TU998.12-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 023835 号

责任编辑:何舒民 李昱颖 王超 胡超 / 责任校对:郝岚

责任印刷:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年7月第一版 开本: B5 (720 × 1000)

2006年7月第一次印刷 印张: 13 3/4

印数: 1—3 000 字数: 275 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

销售部电话: 010-62136131 编辑部电话: 010-62137026 (BA03)

前 言

火灾可能导致建筑结构发生很大变形甚至倒塌,严重威胁人类的生命财产安全。例如:1994年6月17日,珠海市裕新纺织厂前山纺织城A座厂房火灾后倒塌,死亡93人;2003年11月3日,湖南省衡阳市珠晖区永兴综合楼在火灾中突然倒塌,夺走了20名消防队员的宝贵生命。

发生建筑火灾时,可燃物发生剧烈燃烧,释放出大量热量,通过辐射和对流,传输到建筑构件表面,进而通过热传导向构件内部传递,使构件温度不断升高。高温会使建筑构件产生热膨胀,同时使建筑材料的强度和弹性模量显著降低,导致结构变形增大,直至倒塌,因此,搞清火灾下建筑构件内的温度分布是研究建筑结构力学反应的前提。

随着有限单元法和计算机技术的发展,数值模拟已经成为科学研究和工程设计的一种重要手段。对建筑结构火灾反应进行数值模拟包括火灾场景模拟、构件内温度场模拟、结构位移和内力计算三大主要部分,本书主要介绍火灾下建筑构件内温度场数值模拟这一中间环节,重点介绍开发数值模拟软件涉及的理论基础和编程方法。

作者近年来主要从事建筑结构抗火性能、有限元理论及软件开发、科学可视化等方面的研究工作,开发了一些具有良好的前后处理系统的有限元软件。本书以作者开发的火灾下建筑构件内温度场数值模拟软件的简明版本TF为主线,详细介绍了火灾下建筑构件内温度场数值模拟软件所涉及的所有环节,并给出用Visual Basic 6.0编写的主要源程序,目的是使读者阅读完本书以后,能够快速开发出自己的带有图形化前后处理系统的温度场数值模拟程序。

本书是作者在中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室进行博士后研究期间写成的,因此,作者要特别感谢导师范维澄院士的悉心培养和关怀。同时,作者还要特别感谢我的硕士导师中国农业大学李明瑞教授、博士导师大连理工大学林皋院士、李宏男教授。没有导师的培养和支持,就没有本书的出版。

由于火灾下建筑构件内温度场数值模拟涉及内容十分广泛,加上作者水平有限,书中还存在不足之处,如蒙读者指正,将不胜感激。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 火灾对建筑结构的危害	1
1.2 火灾对建筑结构造成危害的原因	4
1.3 建筑构件内温度场研究进展	7
1.4 本书内容安排	10
参考文献	11
第 2 章 温度场数值模拟的基础知识	13
2.1 传热学基本理论	13
2.1.1 傅立叶定律	13
2.1.2 二维问题导热微分方程	13
2.1.3 三维问题导热微分方程	14
2.1.4 初始条件和边界条件	15
2.2 有限单元法基本理论	16
2.2.1 有限单元法的产生	16
2.2.2 有限单元法的一些基本概念及基本原理	16
2.2.3 二维温度场的有限元方程	17
2.2.4 三维温度场的有限元方程	20
2.3 Visual Basic 的基本知识	22
2.3.1 Visual Basic 简介	23
2.3.2 与程序界面相关的 Visual Basic 概念	24
2.3.3 与程序代码相关的 Visual Basic 语句	26
2.3.4 建立一个 Visual Basic 计算程序的过程	27
2.3.5 计算程序的工程文件的构成	29
参考文献	29
第 3 章 温度场数值模拟软件 TF	31
3.1 TF 简介	31
3.2 前处理器	32
3.3 材料库文件	33
3.3.1 材料热工性能参数	33
3.3.2 材料库文件	35
3.4 边界库文件	36

3.4.1	防火分区内升温曲线	36
3.4.2	边界库文件	38
3.5	初始数据文件	41
3.5.1	运算控制文件	41
3.5.2	几何数据文件	43
3.5.3	边界号文件	45
3.5.4	初始条件文件	47
3.6	计算模块	48
3.7	后处理器	48
3.8	TF 软件解题的一般过程	50
	参考文献	50
第 4 章	二维温度场计算模块 TEMP2D	51
4.1	TEMP2D 的总体结构	51
4.1.1	TEMP2D 的计算流程	51
4.1.2	单元调度程序	54
4.1.3	单元的标准格式	55
4.2	三结点三角形单元的开发	56
4.2.1	求解区域的离散	56
4.2.2	三结点三角形单元的形函数	56
4.2.3	单元的导热刚度矩阵	58
4.2.4	单元的蓄热刚度矩阵	61
4.2.5	单元的边界贡献矩阵	62
4.2.6	单元的温度荷载向量	66
4.3	形成总体刚度矩阵	68
4.3.1	单刚中元素的总体编码	68
4.3.2	单刚的总体集成	70
4.3.3	一维变带宽存储总刚	72
4.3.4	单刚中元素在一维数组中位置	73
4.3.5	形成温度总刚和蓄热总刚的源程序	74
4.4	形成总体温度荷载向量	76
4.5	求解瞬态温度场有限元方程的方法	77
4.6	LDL^T 分解法解线性方程组	78
4.6.1	把矩阵 $[A]$ 分解成 LDL^T	78
4.6.2	解方程组	79
4.6.3	解方程组的源程序	79
	参考文献	82

第 5 章 二维等参单元	83
5.1 四结点四边形等参单元	83
5.1.1 四结点四边形等参单元的形函数	83
5.1.2 等参单元的一些基本变换	84
5.1.3 四结点四边形等参单元的导热单刚和蓄热单刚	86
5.1.4 四结点四边形等参单元的高斯积分	87
5.1.5 形成四结点四边形等参单元导热单刚的源程序	88
5.1.6 形成四结点四边形等参单元蓄热单刚的源程序	91
5.1.7 四结点四边形等参单元的边界贡献矩阵	92
5.1.8 四结点四边形等参单元的温度荷载向量	94
5.2 六结点三角形等参单元	95
5.2.1 六结点三角形单元的形函数	95
5.2.2 六结点三角形单元的导热单刚及蓄热单刚	96
5.2.3 单元边界贡献矩阵	98
5.2.4 单元温度荷载向量	99
5.3 其他二维等参单元	100
5.3.1 四边形等参单元的形函数	100
5.3.2 三角形等参单元的形函数	102
5.4 四结点矩形单元	103
5.4.1 四结点矩形单元的导热单刚	103
5.4.2 四结点矩形单元的蓄热单刚	105
5.5 二维热阻单元	106
参考文献	107
第 6 章 三维温度场分析	108
6.1 八结点六面体等参单元	108
6.1.1 形函数及其对自然坐标的导数	108
6.1.2 雅可比矩阵及 $[B]$ 矩阵	109
6.1.3 三维空间的一些变换公式	110
6.1.4 八结点六面体等参单元的导热单刚	111
6.1.5 八结点六面体等参单元的蓄热单刚	116
6.1.6 边界贡献矩阵	119
6.1.7 单元温度荷载向量	123
6.2 其他六面体等参单元	126
6.3 八结点长方体单元	128
6.3.1 八结点长方体单元的导热单刚	129
6.3.2 八结点长方体单元的蓄热单刚	131

6.3.3	八结点长方体单元边界贡献矩阵	132
6.3.4	八结点长方体单元的温度荷载向量	132
6.4	四结点四面体单元	133
6.4.1	四结点四面体单元的形函数	133
6.4.2	四结点四面体单元的一些基本矩阵	134
6.4.3	四结点四面体单元的导热单刚	135
6.4.4	四结点四面体单元的蓄热单刚	135
6.4.5	四结点四面体单元的边界贡献矩阵	136
6.4.6	四结点四面体单元的温度荷载向量	137
6.5	六结点三棱柱单元	138
6.6	直三棱柱单元	139
6.7	三维热阻单元	141
	参考文献	142
第7章	前处理技术	143
7.1	二维网格自动剖分的映射方法	143
7.2	二维网格的显示、放缩、移动	150
7.2.1	坐标系统的设定	150
7.2.2	有限元网格的显示	154
7.2.3	有限元网格的填充	155
7.2.4	有限元网格的放缩及移动	156
7.3	编辑材料号和边界号	158
7.4	橡皮筋技术	161
7.5	三维网格的坐标变换	164
7.6	三维网格的消隐计算	165
7.6.1	一些基本概念	166
7.6.2	自遮挡隐藏面的确定	167
7.6.3	最终可见线段的确定	168
7.7	深度优先级排序表的确定	170
	参考文献	171
第8章	后处理技术	172
8.1	颜色与温度的关系	173
8.1.1	颜色模型	173
8.1.2	颜色与温度的函数关系	174
8.2	扫描母元法原理	175
8.2.1	理论基础	175
8.2.2	牛顿-拉夫逊法求自然坐标的过程	177

8.2.3 画单元云图的过程	178
8.3 画温度场云图的主要源程序	178
8.4 用扫描母元法画三角形单元云图	182
8.4.1 画三角形单元云图的原理	182
8.4.2 画三角形单元云图的过程	183
8.5 三维数据场云图	186
参考文献	187
第9章 算例	188
9.1 梁板系统截面内温度场	188
9.2 钢筋混凝土柱截面内温度场	190
9.3 圆形钢管混凝土柱截面内温度场	193
9.4 钢-混凝土组合楼板内温度场	198
9.5 梁柱结点内三维温度场	204
附录 源程序中使用的模块级全程变量及窗体级全程变量索引表	209

第 1 章 绪 论

1.1 火灾对建筑结构的危害

火灾是失去控制的灾害性的燃烧现象,是发生最频繁且极具毁灭性的灾害之一。火灾造成的直接损失约为地震的 5 倍,仅次于干旱和洪涝,而发生的频度却居于各种灾害之首^[1]。建筑火灾一般是指危害建筑物中生命、财产及建筑物本身的火灾,是一种常见的火灾类型。随着经济和技术的发展,建筑的高度、设备的复杂程度以及人员和财产的密集程度都在增大,导致建筑火灾发生的次数增多,每次火灾造成的生命和财产损失很大。例如,1994 年 11 月 27 日,辽宁阜新艺苑歌舞厅火灾,死亡 233 人;1994 年 12 月 8 日,新疆克拉玛依友谊馆火灾,死亡 325 人;1993 年 8 月 12 日,当时北京十大商场之一的隆福大厦发生火灾,直接经济损失 2100 万元,是建国后北京市损失最大的一次火灾^[2]。建筑火灾除了直接危害人类的生命财产以外,对建筑结构也产生明显不利影响,建筑结构在火灾中严重破坏甚至倒塌的情况屡有发生。

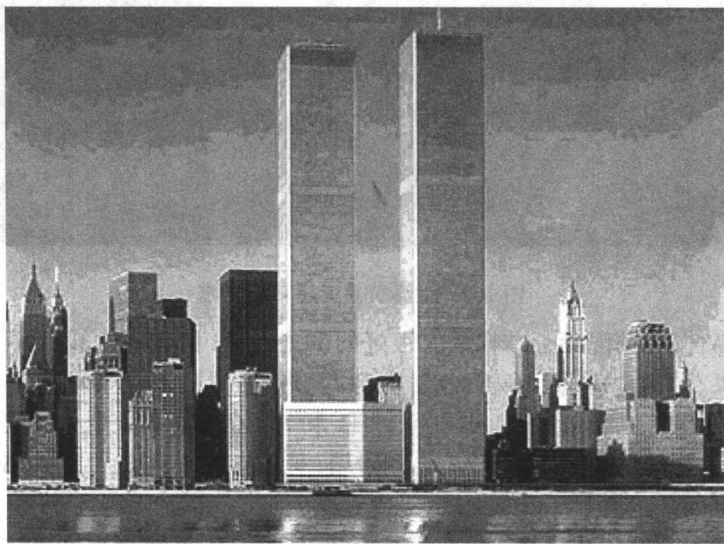


图 1.1 “9·11”以前纽约世界贸易大厦双塔

普通钢材在 400°C 时屈服强度下降至常温下强度的一半,在 600°C 时基本丧失全部强度,因此,钢结构在火灾中很容易发生严重破坏甚至倒塌,文献[3]列举了一些实例。典型的火致钢结构倒塌的案例发生在美国。纽约世界贸易大厦双塔(见图 1.1)是美国的象征之一,2001 年 9 月 11 日,当地时间上午 8 点 45 分,北塔遭到波音 757 飞机撞击;9 时 03 分,南塔遭到波音 767 飞机撞击。撞击以后,大楼发生燃烧,北塔在 1 小时 43 分后倒塌,南塔在 1 小时 02 分后倒塌,成为一片废墟(见图 1.2)。美国随后组织了大规模的调查研究,对世贸大厦进行评估、分析,得出结论之一是:飞机撞击对建筑结构造成的损伤并不足以使大厦倒塌,撞击后引发的大规模燃烧是世贸大厦倒塌的重要原因^[4]。



图 1.2 世界贸易大厦双塔废墟

一般而言,钢筋混凝土结构具有很好的耐火性能,但若耐火设计不当,也会造成严重后果。例如,南昌万寿宫商城,底部两层钢筋混凝土框架结构是商场,上部 7 层是住宅,高度 32.4m,1993 年 5 月 13 日 20 时 30 分商场发生火灾,在火灾发生轰燃后两小时,柱子失效,整个建筑物倒塌(见图 1.3),致使 123 户 603 人无家可归^[2]。

湖南省衡阳市珠晖区的八层永兴综合楼,底层是钢筋混凝土框架结构,上面为砖混结构的住宅,2003 年 11 月 3 日凌晨,在火灾中突然倒塌,夺走了 20 名消防官兵的宝贵生命。



图 1.3 南昌万寿宫商城在火灾后成为一片废墟

2004 年 12 月 21 日清晨 7 点 43 分, 湖南省常德市鼎城区武陵镇桥南市场发生火灾。火灾起源于一栋 4 层的商业楼, 使用面积为 7 万平方米, 过火面积约 5 万平方米, 13 时许, 商业楼第 4 层的西南角突然发生局部坍塌, 1 名消防战士被埋压在废墟中, 幸运的是, 被困近 7 个小时以后成功获救。

广东省珠海市裕新纺织厂前山纺织城 A 座厂房, 是六层钢筋混凝土框架结构, 1994 年 6 月 16 日 16 时 30 分发生火灾, 大火扑灭后清理现场时结构倒塌, 死亡 93 人, 伤 156 人, 重伤 48 人, 直接经济损失 9515 万元^[5]。与此类似, 2000 年 7 月 19 日, 埃及亚历山大市纺织厂火灾, 发生火灾后 9 个小时, 6 层的钢筋混凝土厂房突然倒塌(见图 1.4), 夺去 27 人的生命^[6]。



图 1.4 埃及亚历山大市纺织厂厂房在火灾中倒塌

1.2 火灾对建筑结构造成危害的原因

火灾对建筑结构造成危害的原因是火灾产生的高温。火场可燃物燃烧产生的热量通过对流、辐射传到构件表面,再通过热传导,向构件内部传递,导致整个构件内温度不均匀升高。构件温度不均匀升高将产生三个方面影响:首先,高温会使材料弹性模量降低,结构刚度下降;其次,高温使材料强度降低,甚至熔化,导致结构承载能力下降;再次,构件内部不均匀升温,使构件内部及整个结构中产生不均匀热膨胀,从而使构件内部及整个结构中产生很大的附加应力。这三方面共同作用的结果是建筑构件变形增大、开裂、屈曲、破坏,甚至局部或整体倒塌。以上这些现象,在实验室以及火灾现场都能够发现。

英国 BRE(Building Research Establishment)的专家于 1993 年建立了一个 8 层钢结构办公楼足尺模型,高 33m,占地面积 $21\text{m} \times 45\text{m}$,进行了一系列实验,获得了大量有用的数据。图 1.5 是实验后梁的照片,由于高温下钢的弹性模量降低,钢梁的挠度明显增大;图 1.6 是柱的变形照片,由于高温下钢材的强度明显降低,钢柱被压屈服,缩短 18mm;图 1.7 是梁的翼缘局部屈曲、腹板起皱的照片^[7]。

一个 6 层钢筋混凝土框架办公楼,楼板厚 18cm,柱尺寸 $41\text{cm} \times 41\text{cm}$,火灾后检查发现,由于楼板的膨胀,使柱顶发生约 60cm 的横向位移,导致柱发生横向剪切破坏^[6](见图 1.8)。

对于高性能混凝土构件,破坏原因更复杂一些。高温下,混凝土内部发生一些物理变化和化学变化,游离水、结晶水不断汽化,蒸汽压力增加,向压力小的区域运

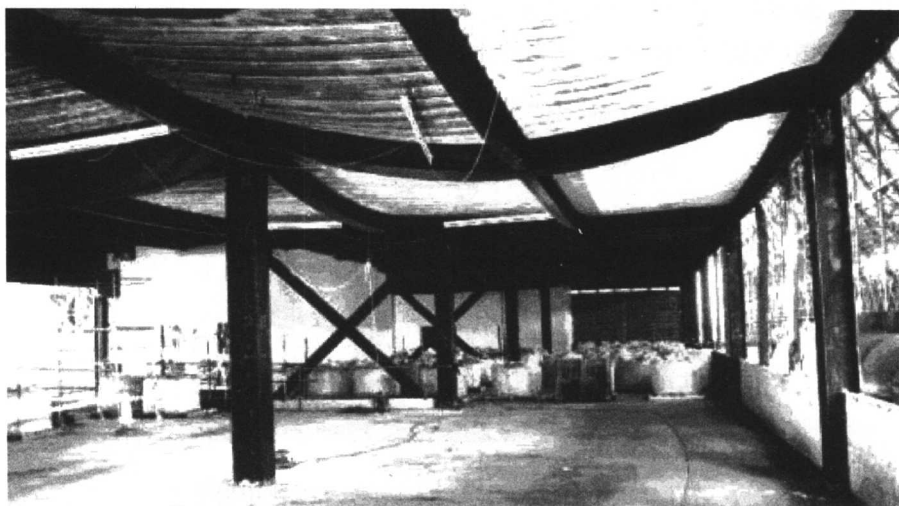


图 1.5 高温作用下,弹性模量降低,钢梁发生很大变形

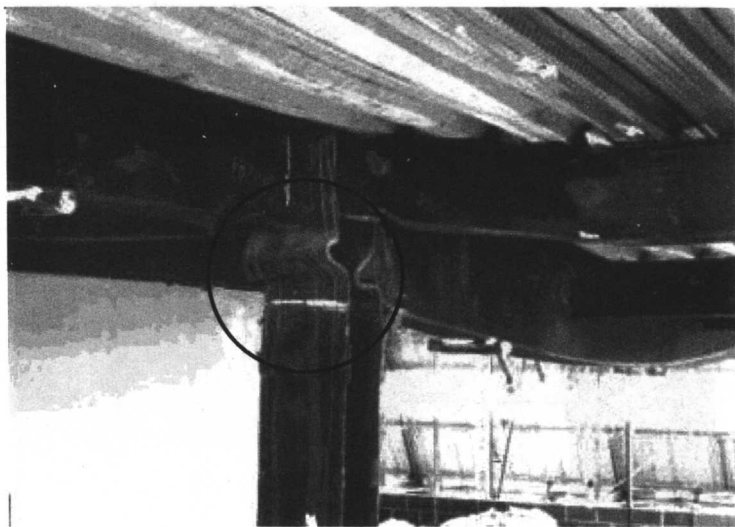


图 1.6 高温作用下,强度降低,钢柱发生破坏

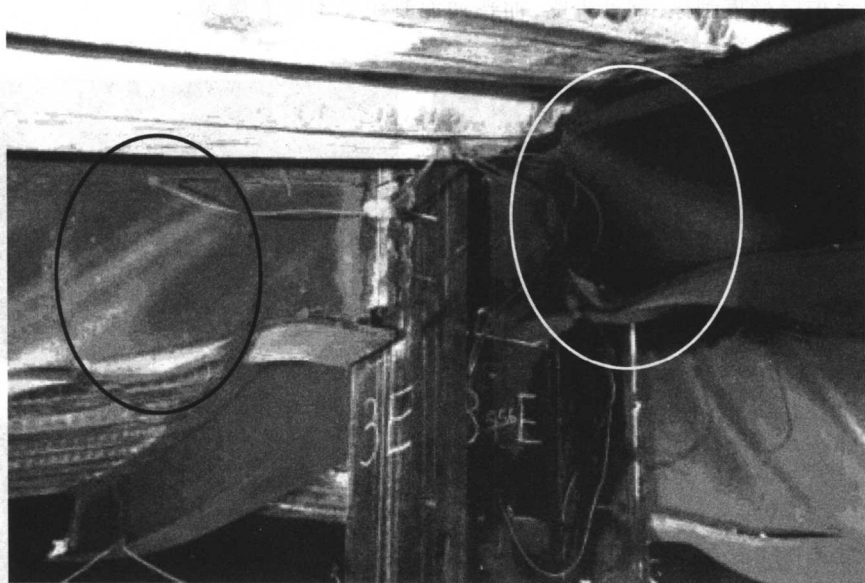


图 1.7 梁的翼缘局部屈曲,腹板起皱

动,因此包含了传热、传质过程,是温度场、蒸汽压力场、水分浓度场三场耦合问题。由于高性能混凝土质地致密,水分不易扩散,使蒸汽压力不断增大,结果引起混凝土爆裂、剥落,使内部钢筋直接受热,增大倒塌的可能性。图 1.9 是普通混凝土柱

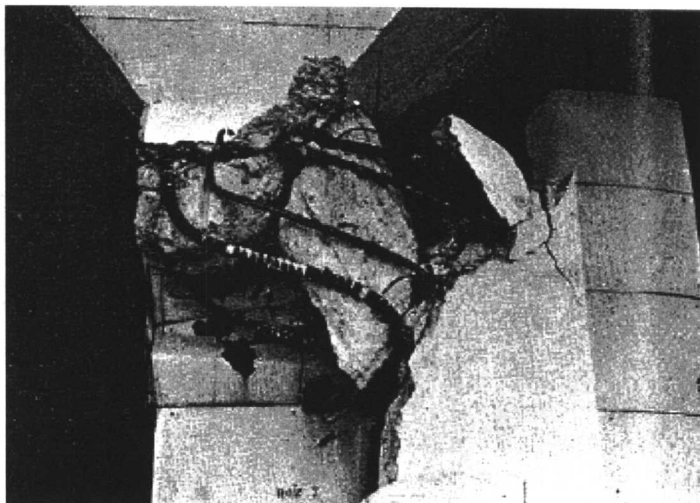


图 1.8 楼板膨胀导致钢筋混凝土柱产生横向剪切破坏

及高性能混凝土柱在试验炉中受高温后的对比^[7],可以发现,高性能混凝土柱的钢筋的保护层严重剥落,钢筋外露,而普通混凝土基本没有爆裂。

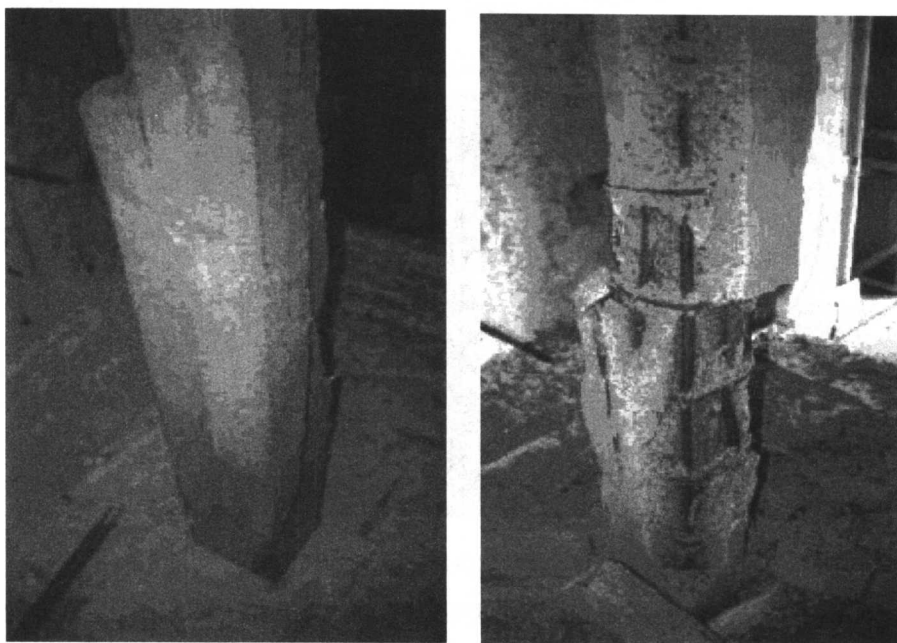


图 1.9 普通混凝土柱(左)及高性能混凝土柱(右)高温后对比

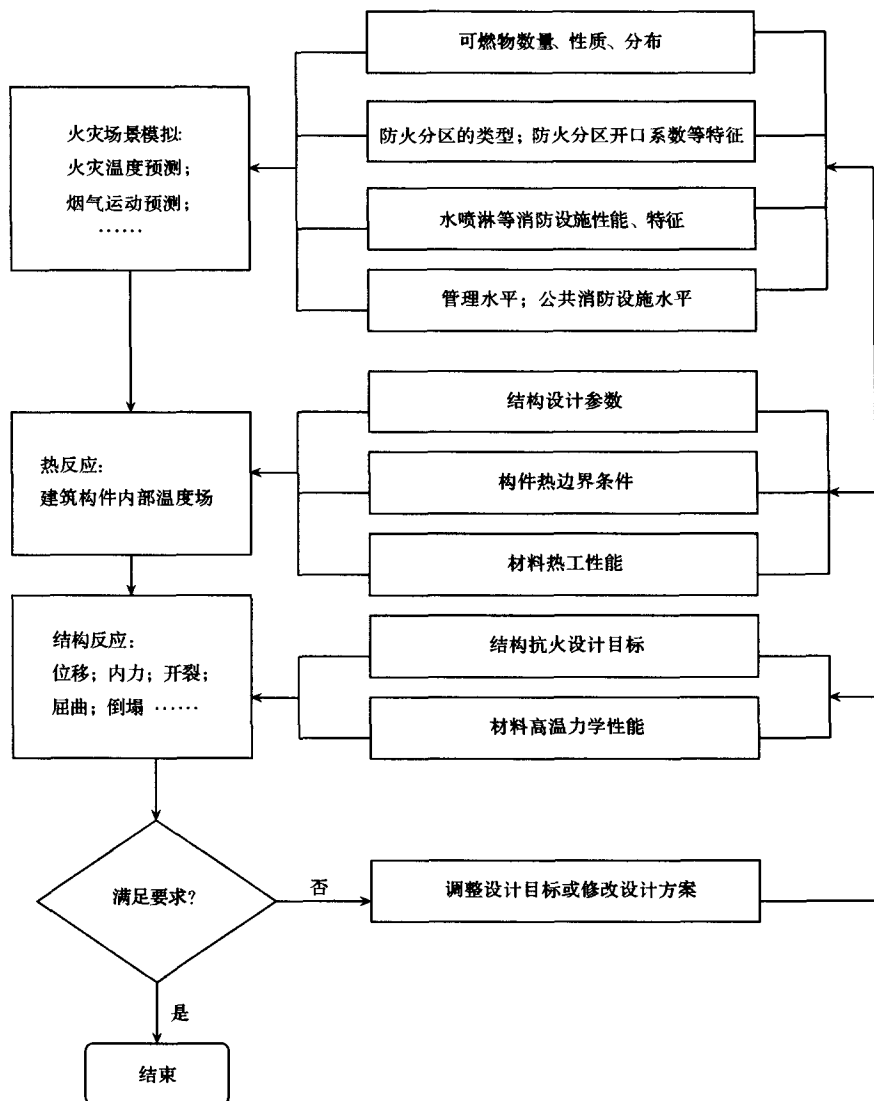


图 1.10 性能化结构抗火设计流程

1.3 建筑构件内温度场研究进展

建筑结构在火灾中严重破坏或倒塌产生的严重后果可以归纳为三点:首先是直接威胁建筑内部居民或工作人员的生命,同时严重威胁消防队员的生命;其次是给抢救建筑内部的财产造成巨大困难,例如吉林博物馆火灾,由于楼顶倒塌,大批

文物无法抢救;再次是延长结构功能恢复周期。为了避免出现这些严重后果,必须对建筑结构火灾反应进行系统研究,搞清建筑结构火灾反应规律,合理进行火灾安全设计,使建筑结构具有适当的安全水平。目前我国建筑结构耐火设计采用的基于规范的处理方式设计方法有很多不足,理想的方法是采用基于计算的性能化设计方法,这种方法的设计流程^[8]如图 1.10 所示。其中,构件内温度场分析处于承上启下的位置,具有重要的意义。

经过各国学者的努力,建筑构件内温度场分析的理论方法及计算机程序都有了较大发展。差分法是早期研究中经常采用的一种数值计算方法,文献[9,11]采用差分法对构件内温度场进行了分析,获得了较高的精度。但差分法的不足之处是要求求解区域比较规则,因此适用范围有限。有限单元法是计算构件内温度场的一种理想方法,是专门软件和大型通用软件普遍采用的方法。发生建筑火灾时,由于建筑材料的导热系数和比热容等热工性能参数是温度的函数,且热边界条件不断随时间变化,因此,火灾下建筑构件内温度场是一个复杂的非线性瞬态问题。计算时,通常在空间域上采用有限单元法、在时间域上采用有限差分法,充分利用两者优点来计算建筑构件内温度场随时间的变化。

为了减少计算工作量,目前普遍假设梁、柱等细长构件的温度分布沿轴线方向无变化,把三维温度场问题简化成二维问题。普通钢筋混凝土构件内水分的运动及蒸发对构件内温度场有一定的影响,但计算混凝土内部的水分运动是十分复杂的,因此,在计算普通混凝土构件内的温度场时,通常不考虑水分的影响或者假设水分在一定的温度下蒸发掉。另外,由于火灾下普通混凝土出现爆裂的可能性较小,所以,通常不考虑应力场对温度场的影响。

由于高性能混凝土在高温作用下,很容易产生爆裂的现象,引起混凝土保护层剥落,所以是一个变边界条件问题。对高性能混凝土高温下内部的三场进行准确分析目前还有一定难度。James 等^[12~16]对高温下混凝土构件内温度变化、气压变化、水分运动等采用有限单元法及有限容积法进行了分析,取得了较好的效果。这些研究成果对研究高性能混凝土的抗火性能具有非常重要的意义。

任何良好的理论方法,都必须变成计算机程序,才能得到有效应用,国内外研究者编制了一些火灾下建筑构件温度场分析专用程序,下面对这方面的发展情况进行简要回顾。

1977 年,麻省理工学院和伯克利加州大学联合开发了钢筋混凝土框架结构在火灾中反应的分析软件,该软件由热反应分析模块 FIRES-T 和结构反应分析模块 FIRES-RC 构成^[17,18],经过多次升版,目前已经具备了较强的结构抗火分析的能力。热反应分析模块具有一维、二维、三维单元,并能模拟常见边界条件,可分析单一材料或复合材料的温度场。

1982 年,Anderberg 和 Forsen 在对平板条和柱进行详细的分析和试验研究的基础上,开发了温度场分析程序 TASFER-2 及结构反应分析程序 CONFIRE^[19]。