



高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

Fire Proofing of Structural Engineering

结构工程防火

· 平台课课程群 ·

主编 杜咏 楼国彪 张海燕 蒋首超
主审 李国强



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

结构工程防火

主编 杜咏 楼国彪 张海燕 蒋首超
主审 李国强



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP) 数据

结构工程防火/杜咏,楼国彪,张海燕,等主编. —武汉:武汉大学出版社,2014.4
高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材
ISBN 978-7-307-12646-6

I. 结… II. ①杜… ②楼… ③张…[等] III. 结构工程—防火—高等学校—教材
IV. TU892

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 002212 号

责任编辑:余 梦 责任校对:邓 瑶 装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:武汉市金港彩印有限公司

开本:880×1230 1/16 印张:15.25 字数:486 千字

版次:2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-12646-6 定价:35.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

学术委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:周创兵

副主任委员:方 志 叶列平 何若全 沙爱民 范 峰 周铁军 魏庆朝

委 员:王 辉 叶燎原 朱大勇 朱宏平 刘泉声 孙伟民 易思蓉

周 云 赵宪忠 赵艳林 姜忻良 彭立敏 程 桦 靖洪文

编审委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:李国强

副主任委员:白国良 刘伯权 李正良 余志武 邹超英 徐礼华 高 波

委 员:丁克伟 丁建国 马昆林 王 成 王 湛 王 媛 王 薇

王广俊 王天稳 王曰国 王月明 王文顺 王代玉 王汝恒

王孟钧 王起才 王晓光 王清标 王震宇 牛荻涛 方 俊

龙广成 申爱国 付 钢 付厚利 白晓红 冯 鹏 曲成平

吕 平 朱彦鹏 任伟新 华建民 刘小明 刘庆潭 刘素梅

刘新荣 刘殿忠 闫小青 祁 皓 许 伟 许程洁 许婷华

阮 波 杜 咏 李 波 李 斌 李东平 李远富 李炎锋

李耀庄 杨 杨 杨志勇 杨淑娟 吴 昊 吴 明 吴 轶

吴 涛 何亚伯 何旭辉 余 锋 冷伍明 汪梦甫 宋固全

张 红 张 纯 张飞涟 张向京 张运良 张学富 张晋元

张望喜 陈辉华 邵永松 岳健广 周天华 郑史雄 郑俊杰

胡世阳 侯建国 姜清辉 娄 平 袁广林 桂国庆 贾连光

夏元友 夏军武 钱晓倩 高 飞 高 玮 郭东军 唐柏鉴

黄 华 黄声享 曹平周 康 明 阎奇武 董 军 蒋 刚

韩 峰 韩庆华 舒兴平 童小东 童华炜 曾 珂 雷宏刚

廖 莎 廖海黎 缪宇宁 黎 冰 戴公连 戴国亮 魏丽敏

出版技术支持

(按姓氏笔画排名)

项目团队:王 睿 白立华 曲生伟 蔡 巍

特别提示

教学实践表明,有效地利用数字化教学资源,对于学生学习能力以及问题意识的培养乃至怀疑精神的塑造具有重要意义。

通过对数字化教学资源的选取与利用,学生的学习从以教师主讲的单向指导的模式而成为一次建设性、发现性的学习,从被动学习而成为主动学习,由教师传播知识而到学生自己重新创造知识。这无疑是锻炼和提高学生的信息素养的大好机会,也是检验其学习能力、学习收获的最佳方式和途径之一。

本系列教材在相关编写人员的配合下,将逐步配备基本数字教学资源,其主要内容包括:

课程教学指导文件

- (1)课程教学大纲;
- (2)课程理论与实践教学时数;
- (3)课程教学日历:授课内容、授课时间、作业布置;
- (4)课程教学讲义、PowerPoint 电子教案。

课程教学延伸学习资源

- (1)课程教学参考案例集:计算例题、设计例题、工程实例等;
- (2)课程教学参考图片集:原理图、外观图、设计图等;
- (3)课程教学试题库:思考题、练习题、模拟试卷及参考解答;
- (4)课程实践教学(实习、实验、试验)指导文件;
- (5)课程设计(大作业)教学指导文件,以及典型设计范例;
- (6)专业培养方向毕业设计教学指导文件,以及典型设计范例;
- (7)相关参考文献:产业政策、技术标准、专利文献、学术论文、研究报告等。

 本书基本数字教学资源及读者信息反馈表请登录www.stmpress.cn下载,欢迎您对本书提出宝贵意见。

丛书序

土木工程涉及国家的基础设施建设,投入大,带动的行业多。改革开放后,我国国民经济持续稳定增长,其中土建行业的贡献率达到1/3。随着城市化的发展,这一趋势还将继续呈现增长势头。土木工程行业的发展,极大地推动了土木工程专业教育的发展。目前,我国有500余所大学开设土木工程专业,在校生达40余万人。

2010年6月,中国工程院和教育部牵头,联合有关部门和行业协(学)会,启动实施“卓越工程师教育培养计划”,以促进我国高等工程教育的改革。其中,“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划”由住房和城乡建设部与教育部组织实施。

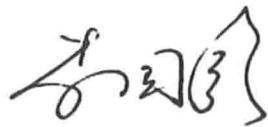
2011年9月,住房和城乡建设部人事司和高等学校土建学科教学指导委员会颁布《高等学校土木工程本科指导性专业规范》,对土木工程专业的学科基础、培养目标、培养规格、教学内容、课程体系及教学基本条件等提出了指导性要求。

在上述背景下,为满足国家建设对土木工程卓越人才的迫切需求,有效推动各高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,促进高等学校土木工程专业教育改革,2013年住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会启动了“高等教育教学改革土木工程专业卓越计划专项”,支持并资助有关高校结合当前土木工程专业高等教育的实际,围绕卓越人才培养目标及模式、实践教学环节、校企合作、课程建设、教学资源建设、师资培养等专业建设中的重点、亟待解决的问题开展研究,以对土木工程专业教育起到引导和示范作用。

为配合土木工程专业实施卓越工程师教育培养计划的教学改革及教学资源建设,由武汉大学发起,联合国内部分土木工程教育专家和企业工程专家,启动了“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材”建设项目。该系列教材贯彻落实《高等学校土木工程本科指导性专业规范》《卓越工程师教育培养计划通用标准》和《土木工程卓越工程师教育培养计划专业标准》,力图以工程实际为背景,以工程技术为主线,着力提升学生的工程素养,培养学生的工程实践能力和工程创新能力。该系列教材的编写人员,大多主持或参加了住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会的“土木工程专业卓越计划专项”教改项目,因此该系列教材也是“土木工程专业卓越计划专项”的教改成果。

土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,需要校企合作,期望土木工程专业教育专家与工程专家一道,共同为土木工程专业卓越工程师的培养作出贡献!

是以为序。



2014年3月于同济大学四平路校区

前 言

火点燃了人类文明进程的起点,但火失去控制则会对人类社会造成危害。为了防治和减轻这种灾害的影响程度,国际、国内都制定了相关的火灾安全规范,其中,火与结构之间的相互作用和影响是结构工程师必须考虑的作用效应。因此,对学生进行结构工程防火知识的教育是整个土木工程卓越工程师培养教学计划中不可缺少的环节。

结构工程防火是防火安全工程范畴的一门分支学科,火灾与地震灾害及风灾害一样,均会对建筑结构造成损伤。随着日益丰富的建筑形式在中国层出不穷地涌现,不同功能的建筑在使用周期内对火灾安全性的要求已远非建筑消防区划指标所能囊括。美国“9·11”事件中两幢钢结构塔楼倒塌;2003年衡阳市“11·3”大火中8层钢筋混凝土建筑倒塌,以及其他重大火灾事故均表明,科学地评价建筑结构在火灾中的安全性以及有效地提高建筑结构在火灾中的承载能力,是结构工程设计中必须进行的工作。

本教材基于“结构力学”、“钢结构”、“钢筋混凝土结构”和“建筑材料”等相关专业课程的教学内容,以深入浅出地引领学生建立对建筑火灾基本认识为目的,结合国内外先进的结构防火技术,根据多所高等院校实施该课程的教学经验编写而成。在编写过程中,编者力求做到以下几点:

① 本教材主要适应本科生、研究生的教学要求,坚持精简原则,以介绍最基本的结构防火知识为主,适当介绍一些国外相关规范的内容。

② 对结构工程防火所涉及的火灾学、燃烧学、传热学知识,均直接介绍基本理论,不进行深入剖析,所涉及的各种结构设计原理及荷载作用均参照现行国家标准及行业标准编写,使学生通过本教材的学习,能够提高将来从事结构工程设计的能力,同时具备进一步深入学习的知识储备。

③ 结构工程防火是应用性很强的学科,在选取本教材典型例题和习题时,尽量结合工程实际需要,所列举的工程案例均源自实际工程中面临并已解决的结构防火问题,增强学生的实际工程应用能力,并把理论与实践相结合的理念贯穿全书。

本教材共11章,分别介绍了建筑火灾基础知识,建筑物耐火等级与耐火极限,火灾下结构构件的升温,高温下结构的材料性能,结构抗火设计的一般原则与方法,钢结构构件、钢筋混凝土构件、组合构件实用抗火计算与设计,以及钢结构防火保护措施,钢筋混凝土结构火灾后的鉴定与修复补强。

本教材由杜咏、楼国彪、张海燕、蒋首超担任主编,由杜咏负责统稿。具体编写分工如下:南京工业大学杜咏(前言、第1~4章、第6章、第7章、附录);同济大学楼国彪(第3~7章、第9章、第10章);同济大学蒋首超(第3~7章、第9章、第10章);华南理工大学张海燕(第5章、第8章、第11章)。

全书由同济大学李国强教授担任主审,并对本书的编写工作提出了宝贵的意见,特致谢意。

在教材编写过程中,编者参阅、借鉴和引用了许多其他专著和文献资料,同时,硕士生盛红梅、倪建生、沈亮、占孟秦、邹捷等协助完成了大量编写工作,在此对他们一并致以诚挚的谢意。

限于编者水平,本书作为国内第一本结构工程火灾安全范畴的规范化教材,还存在一些疏漏之处,敬请读者批评指正。

特别鸣谢:奥雅纳工程咨询公司、上海消防科学研究所、南京工业大学建筑设计研究院、中国核工业华兴建设有限公司江苏分公司对本书编写工作给予的大力协助。

编 者

2013年10月

目 录

1 绪论	(1)	4 火灾下结构构件的升温	(37)
1.1 火灾的危害	(2)	4.1 传热学基本原理	(38)
1.1.1 火灾的定义及分类	(2)	4.1.1 导热	(38)
1.1.2 火灾对社会经济的危害	(2)	4.1.2 热对流	(38)
1.1.3 火灾对建筑结构的危害	(4)	4.1.3 热辐射	(38)
1.2 建筑火灾安全的主要范畴	(6)	4.1.4 火灾环境与构件表面间的 热量交换	(39)
1.3 建筑结构抗火设计的意义	(7)	4.2 火灾下钢构件升温计算方法	(40)
1.4 建筑结构抗火设计方法的发展	(8)	4.2.1 钢构件内部的热传导	(40)
知识归纳	(9)	4.2.2 钢构件升温计算模型	(41)
独立思考	(9)	4.2.3 钢构件截面温度均匀分布 升温计算	(41)
2 建筑火灾基础知识	(10)	4.2.4 钢构件截面温度非均匀分布 升温计算	(50)
2.1 建筑火灾历程	(11)	4.3 火灾下钢筋混凝土构件截面 温度场计算	(53)
2.1.1 建筑火灾发生的条件	(11)	4.3.1 钢筋混凝土构件温度场特点 及影响因素	(53)
2.1.2 建筑火灾的发展过程	(11)	4.3.2 钢筋混凝土构件温度场 计算方法	(53)
2.2 建筑火灾荷载与火灾参数	(13)	4.3.3 有非燃饰面层的钢筋混凝土 构件温度场计算	(54)
2.2.1 可燃物的燃烧性能	(13)	知识归纳	(55)
2.2.2 火灾荷载	(15)	独立思考	(56)
2.2.3 建筑火灾发展的定量描述	(17)		
2.3 建筑火灾模化	(21)	5 高温下结构的材料性能	(57)
2.4 火灾升温曲线	(24)	5.1 高温下结构钢的物理特性	(58)
2.4.1 标准升温曲线	(24)	5.1.1 热膨胀系数	(58)
2.4.2 大空间建筑火灾升温曲线	(26)	5.1.2 热传导系数	(58)
知识归纳	(29)	5.1.3 比热容	(59)
独立思考	(29)	5.1.4 密度	(59)
3 建筑物耐火等级与耐火极限	(30)	5.2 高温下结构钢的力学性能	(59)
3.1 建筑物耐火等级	(31)	5.2.1 应力-应变关系	(59)
3.1.1 一般民用建筑的耐火等级	(31)	5.2.2 屈服强度	(60)
3.1.2 高层民用建筑的耐火等级	(31)	5.2.3 弹性模量	(61)
3.1.3 厂房建筑的耐火等级	(32)		
3.1.4 仓库建筑的耐火等级	(33)		
3.2 建筑结构构件耐火极限	(34)		
知识归纳	(36)		
独立思考	(36)		

5.2.4 泊松比	(62)	6.2 结构抗火设计目标	(84)
5.2.5 高温蠕变与松弛	(62)	6.3 结构抗火设计方法	(85)
5.3 高温过火冷却后结构钢的力学性能	(63)	6.3.1 基于试验的结构抗火设计方法	(85)
5.3.1 表观特征及力学性能影响机理	(63)	6.3.2 基于计算的结构抗火设计方法	(85)
5.3.2 屈服强度与应力-应变关系	(64)	6.3.3 性能化结构抗火设计方法	(86)
5.3.3 弹性模量	(65)	6.4 结构抗火设计抗力取值及荷载效应组合	(86)
5.4 高温下混凝土的热物理特性	(65)	6.4.1 基于概率可靠度的极限状态设计法	(86)
5.4.1 热膨胀系数	(66)	6.4.2 抗力取值	(87)
5.4.2 热传导系数	(66)	6.4.3 荷载效应组合	(87)
5.4.3 比热容	(66)	6.5 火灾下结构内力计算方法	(88)
5.4.4 密度	(67)	6.5.1 局部火灾下由外荷载产生的结构构件内力计算方法	(88)
5.5 高温下混凝土的力学性能	(67)	6.5.2 局部火灾下结构构件温度内力计算方法	(88)
5.5.1 抗压强度	(67)	知识归纳	(89)
5.5.2 抗拉强度	(68)	独立思考	(89)
5.5.3 弹性模量	(69)	7 钢结构构件抗火计算与设计	(90)
5.5.4 应力-应变关系	(69)	7.1 轴心受力构件	(91)
5.5.5 高强混凝土的力学性能	(69)	7.1.1 高温下轴心受拉钢构件的承载力计算	(91)
5.6 高温后混凝土的力学性能	(70)	7.1.2 高温下轴心受压钢构件的受力性能	(92)
5.6.1 抗压强度	(70)	7.1.3 高温下轴心受压钢构件的稳定系数	(93)
5.6.2 抗拉强度	(70)	7.1.4 高温下轴心受压构件的承载力计算	(94)
5.6.3 弹性模量	(71)	7.2 受弯构件	(96)
5.6.4 应力-应变关系	(71)	7.2.1 高温下受弯钢构件临界弯矩计算	(96)
5.7 高温下钢筋的材料性能	(71)	7.2.2 高温下受弯钢构件的整体稳定系数	(97)
5.7.1 普通钢筋的材料性能	(71)	7.2.3 高温下受弯钢构件的承载力计算	(98)
5.7.2 预应力筋的材料性能	(72)	7.3 拉弯构件和压弯构件	(100)
5.7.3 钢筋和混凝土高温黏结强度	(73)	7.3.1 高温下拉弯或压弯钢构件的强度	(100)
5.8 国外抗火设计中对材料性能的取值	(73)		
5.8.1 高温下结构钢的物理性能	(74)		
5.8.2 高温下结构钢的力学性能	(75)		
5.8.3 高温下混凝土的物理性能	(78)		
5.8.4 高温下混凝土的力学性能	(79)		
知识归纳	(81)		
独立思考	(81)		
6 结构抗火设计的一般原则与方法	(82)		
6.1 结构抗火设计要求	(83)		
6.1.1 结构抗火分析模型	(83)		
6.1.2 结构抗火设计总原则	(83)		

7.3.2 高温下压弯构件的稳定性	(100)	8.5.3 加固混凝土构件抗火 设计措施	(141)
7.3.3 拉弯构件和压弯构件的 承载力计算	(101)	知识归纳	(142)
7.4 钢框架梁柱	(105)	独立思考	(142)
7.4.1 高温钢框架梁的承载力 计算	(105)	9 组合构件抗火计算与设计	(144)
7.4.2 高温钢框架柱的承载力 计算	(106)	9.1 型钢混凝土柱	(145)
7.5 钢结构抗火设计工程实例	(110)	9.1.1 型钢混凝土柱抗火性能的 影响因素	(145)
7.5.1 临界温度法	(111)	9.1.2 高温下型钢混凝土柱的 承载力计算	(147)
7.5.2 承载力法	(112)	9.2 钢管混凝土柱	(147)
知识归纳	(119)	9.2.1 钢管混凝土柱抗火性能的 影响因素	(148)
独立思考	(119)	9.2.2 高温下钢管混凝土柱的 承载力计算	(149)
8 钢筋混凝土构件抗火计算与设计	(124)	9.2.3 钢管混凝土柱的防火保护层 厚度计算	(153)
8.1 钢筋混凝土构件受火反应	(125)	9.3 压型钢板组合楼板	(154)
8.1.1 钢筋混凝土构件高温性能 特点	(125)	9.3.1 基于小挠度破坏准则的 设计方法	(154)
8.1.2 钢筋混凝土构件在火灾中 的破坏	(125)	9.3.2 考虑薄膜效应的设计方法	(156)
8.2 钢筋混凝土构件抗火计算方法	(127)	9.4 钢与混凝土组合梁	(160)
8.2.1 构件截面承载力计算方法	(127)	9.4.1 组合梁的类型及受力特点	(160)
8.2.2 钢筋中心至截面边缘的距离 确定	(131)	9.4.2 组合梁的高温破坏模式	(162)
8.3 普通钢筋混凝土构件抗火验算	(132)	9.4.3 组合梁的承载力计算	(166)
8.3.1 梁的抗火承载力	(132)	知识归纳	(170)
8.3.2 柱的抗火承载力	(133)	独立思考	(170)
8.4 普通混凝土构件防火构造措施	(135)	10 钢结构防火保护措施	(172)
8.4.1 梁满足耐火极限要求的 构造措施	(135)	10.1 提高钢结构抗火性能的主要 方法	(173)
8.4.2 柱满足耐火极限要求的 构造措施	(136)	10.2 钢结构防火涂料类型及其 性能	(174)
8.4.3 板满足耐火极限要求的 构造措施	(136)	10.2.1 钢结构防火涂料类型	(174)
8.4.4 墙满足耐火极限要求的 构造措施	(137)	10.2.2 钢结构防火涂料技术要求及 性能指标	(175)
8.5 特殊混凝土构件抗火设计	(138)	10.3 钢结构防火涂料的选用与施工	(176)
8.5.1 高强混凝土构件抗火 设计措施	(138)	10.3.1 防火涂料的选用	(176)
8.5.2 预应力混凝土构件抗火 设计措施	(139)	10.3.2 防火涂料涂装构造	(177)
		10.3.3 钢结构防火涂料施工措施	(177)

10.4 防火板材的性能与施工应用	(178)	11.3 火灾后受损结构的修复加固	(193)
10.4.1 防火板材的基本要求	(178)	11.3.1 修复加固的主要对象	(193)
10.4.2 钢结构防火用板材的类型 及性能	(178)	11.3.2 火灾后结构修复加固的 原则和步骤	(194)
10.4.3 防火板材用于钢结构防火 保护的构造	(179)	11.3.3 常用加固方法	(194)
10.4.4 防火板材的施工	(179)	案例分析	(195)
知识归纳	(183)	知识归纳	(199)
独立思考	(184)	独立思考	(199)
11 钢筋混凝土结构火灾后的鉴定与 修复补强	(185)	附录	(200)
11.1 钢筋混凝土结构火灾后的鉴定 ..	(186)	附录1 建筑火灾常见表面间的辐射角 系数计算公式	(200)
11.1.1 建筑结构火灾后的鉴定内容 和程序	(186)	附录2 防火保护材料的热物理特性	(201)
11.1.2 受火温度判定	(187)	附录3 ISO 834 标准升温条件下有 保护层钢构件的升温	(202)
11.1.3 火灾后结构损伤及材料 性能检测	(189)	附录4 标准火灾升温曲线条件下的 构件截面温度场	(209)
11.1.4 结构损伤评级	(190)	附录5 常温下钢材的强度设计值	(222)
11.2 火灾后钢筋混凝土构件剩余 承载力计算	(192)	附录6 轴心受压构件的截面分类	(223)
11.2.1 火灾后钢筋混凝土构件的 剩余承载力计算方法	(192)	附录7 常温下轴心受压构件的稳定 系数	(225)
11.2.2 火灾后钢筋混凝土构件的 有效截面确定	(192)	参考文献	(229)

绪 论

课前导读

□ 内容提要

本章通过列举诸种建筑火灾案例，论述了结构抗火设计在建筑防火安全中的作用和意义，并简要介绍了结构抗火设计方法的发展，以期明确结构工程抗火课程的学习目的。本章主要内容包括火灾的危害、建筑防火安全的主要范畴、建筑结构抗火设计的意义及结构抗火设计方法的发展。

□ 能力要求

通过本章的学习，学生应了解建筑火灾安全所涵盖的范畴，掌握结构抗火设计方法的发展及结构抗火设计的意义。

1.1 火灾的危害 >>>

1.1.1 火灾的定义及分类

失去人为控制的火会造成灾害,即通常所说的火灾。火灾是火失去人为控制的燃烧过程,其发生、发展和熄灭是一个综合的随着时间变化的物理化学过程。火灾可以按发生的场景、燃烧物、燃烧起因及灾害损失轻重程度分类。

(1) 火灾按发生的场景分类

- ① 城镇火灾,包括建筑火灾、工厂仓库火灾、交通工具火灾。
- ② 野外火灾,包括森林火灾、草原火灾。
- ③ 厂矿火灾。

(2) 火灾按燃烧物分类

- ① 固体可燃物火灾,包括家具、建筑装饰材料等引起的火灾。
- ② 液体可燃物火灾,包括油脂类、化学溶剂类等引起的火灾。
- ③ 气体可燃物火灾,包括煤气、天然气等引起的火灾。
- ④ 可燃金属火灾,包括锂、钾、钠、镁等引起的火灾。

(3) 火灾按燃烧起因分类

- ① 自然性火灾,包括雷击、自燃等引起的火灾。
- ② 行为性火灾,包括纵火、玩火、用火不慎等引起的火灾。

(4) 火灾按损失轻重程度分类

- ① 特大火灾。
- ② 重大火灾。
- ③ 一般火灾。

1.1.2 火灾对社会经济的危害

火在人类进化和生产力发展过程中起到过巨大的作用,然而火失去控制给人类生命财产造成的危害也是巨大的。1989—1991年,美国因火灾造成的直接经济损失分别为92亿美元、82亿美元和109亿美元,日本为4500亿日元、5200亿日元和7900亿日元。世界部分国家因火灾造成的人员死亡人数见表1-1,造成的直接经济损失见表1-2。据表1-3所列的我国火灾统计数据,1993—2011年间平均每年发生火灾187726起,造成直接经济损失15亿元,间接损失为直接经济损失的3倍左右。

表 1-1 世界部分国家每 10 万人口火灾死亡人数

国家	死亡人数/10 万人	国家	死亡人数/10 万人	国家	死亡人数/10 万人
新加坡	0.18	法国	1.02	丹麦	1.61
中国	0.21	捷克	1.18	瑞典	1.64
瑞士	0.43	新西兰	1.20	日本	1.66
西班牙	0.64	英国	1.25	美国	1.77
荷兰	0.68	比利时	1.27	芬兰	1.98
澳大利亚	0.70	斯洛文尼亚	1.34	匈牙利	2.35
奥地利	0.76	加拿大	1.38	俄罗斯	10.1
意大利	0.79	挪威	1.48	平均	1.13
德国	0.92	波兰	1.54	—	—

资料来源:李国强,韩林海,楼国彪,等.钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计.北京:中国建筑工业出版社,2006.

表 1-2

世界部分国家年度火灾直接经济损失与 GDP 的比例

国家	直接经济损失与 GDP 的比例/%	国家	直接经济损失与 GDP 的比例/%	国家	直接经济损失与 GDP 的比例/%
斯洛文尼亚	0.09	西班牙	0.12	法国	0.19
捷克	0.09	英国	0.12	意大利	0.20
日本	0.09	芬兰	0.14	丹麦	0.22
新加坡	0.09	澳大利亚	0.15	瑞典	0.22
美国	0.11	新西兰	0.12	瑞士	0.23
德国	0.12	奥地利	0.16	挪威	0.27
匈牙利	0.12	荷兰	0.17	比利时	0.40
波兰	0.12	加拿大	0.18	平均	0.17

资料来源:李国强,韩林海,楼国彪,等. 钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计. 北京:中国建筑工业出版社,2006.

表 1-3

1950—2011 年我国火灾情况

年份	起数/起	死亡 人数/人	受伤 人数/人	直接经济 损失/万元	年份	起数/起	死亡 人数/人	受伤 人数/人	直接经济 损失/万元
1950 年	19692	327	1290	1233.5	1982 年	50034	2249	2929	18926.3
1951 年	17058	513	2448	2142.5	1983 年	41541	2161	2741	20398.0
1952 年	19819	456	2075	3703.4	1984 年	37026	2085	2690	16086.4
1953 年	37766	1180	4292	4096.5	1985 年	33618	2241	3543	28421.9
1954 年	10257	1414	2461	2645.7	1986 年	34996	2691	4344	32584.5
1955 年	24526	1025	4028	4158.6	1987 年	38766	2411	4009	80560.8
1956 年	74430	3338	10516	6020.1	1988 年	32053	2234	3206	35424.7
1957 年	60196	2634	9420	5520.4	1989 年	29852	1838	3195	49125.7
1958 年	72958	4937	11352	7203.0	1990 年	24154	2172	4926	53688.6
1959 年	114880	10131	14617	11616.9	1991 年	58207	2105	3771	52158.8
1960 年	90845	10843	13809	15993.7	1992 年	45167	1937	3399	69025.7
1961 年	71893	6989	10512	23009.2	1993 年	39391	2378	5937	111658.3
1962 年	65932	4990	8555	17389.6	1994 年	38073	2831	4236	124063.4
1963 年	83690	4798	8697	16691.2	1995 年	37915	2278	3838	110315.5
1964 年	57471	3441	6646	9280.4	1996 年	36856	2225	3428	102908.5
1965 年	73510	4179	8283	9395.9	1997 年	140028	2722	4930	154000
1966 年	85377	5386	12171	9945.5	1998 年	142326	2389	4905	144000
1967 年	36861	1912	4199	6403.4	1999 年	179755	2744	4572	143300
1968 年	25940	1114	2484	5538.9	2000 年	189185	3021	4404	152217.3
1969 年	35205	1348	3615	9651.2	2001 年	215863	2314	3752	139454.2
1970 年	39925	2167	5658	9904.9	2002 年	258315	2893	3414	154000
1971 年	75593	4362	12368	30428.4	2003 年	254811	2497	3098	159402.1
1972 年	78777	4629	10350	26625.7	2004 年	252804	2562	2969	167357.0
1973 年	78777	4337	9095	22141.9	2005 年	235941	2500	2508	136603.4
1974 年	75368	4112	7855	27527.8	2006 年	231881	1720	1565	86044.0
1975 年	70208	4673	8050	21239.7	2007 年	163521	1617	969	112515.8
1976 年	67939	5243	8604	23019.6	2008 年	136835	1521	743	182202.5
1977 年	69993	5178	7970	28564.0	2009 年	129382	1236	651	162392.4
1978 年	66033	3815	7318	21691.7	2010 年	134297	1205	624	195945.2
1979 年	67119	3463	5323	21758.8	2011 年	125417	1108	571	205743.4
1980 年	61449	3043	3710	17609.3	合计	5585129	188309	339941	3683024.3
1981 年	54333	2643	3480	23130.6	—	—	—	—	—

资料来源:中华人民共和国国家统计局网站: <http://www.stats.gov.cn>.

建筑火灾在各类火灾中发生次数最多,损失最大,占全部火灾的 80% 左右。建筑火灾除烧毁生活或生产设备,对人的生命造成威胁外,还毁损建筑室内装饰及门、窗等建筑构件,并可能造成结构构件破坏,甚至引起结构整体倒塌。

1.1.3 火灾对建筑结构的危害

火灾与地震灾害、风灾害一样,是危害建筑结构安全的灾害之一。火灾热量以热辐射、热对流和热传导的方式输入结构,升温导致结构热力耦合效应和结构材料性能的改变。

火灾导致结构破坏的主要表现形式为:构件局部破坏、构件破坏、结构局部倒塌和结构整体倒塌。在火灾中,木结构、钢结构、钢-混凝土组合结构以及钢筋混凝土结构均有典型的破坏实例。其中,火灾对钢结构的破坏尤为严重。

1967 年,美国蒙哥马利市的一个饭店发生火灾,钢结构屋顶被烧塌。1970 年,美国 50 层的纽约第一贸易办公大楼发生火灾,楼盖钢梁被烧扭曲 10 cm 左右。1990 年英国一幢多层钢结构建筑在施工阶段发生火灾,造成钢梁、钢柱和楼盖钢桁架的严重破坏。

2001 年“9·11”事件中,美国纽约世界贸易中心(WTC)两座 110 层 411 m 高的钢密柱框筒结构建筑在火灾中倒塌,造成 2830 人死亡。WTC 大楼倒塌的根本原因是飞机撞击,使如图 1-1(a)、(b)所示部位的外框架柱断裂,造成了结构局部破坏,但通过结构的内力重分布,整体结构不一定会倒塌。可是,飞机的撞击破坏了结构的防火保护层,并引发剧烈火灾(图 1-2),使得钢材材性在高温下急剧下降,梁、柱的承载力显著降低。在强柱弱梁的结构设计条件下,如图 1-3 所示,火灾首先引起楼盖桁架梁坍塌,梁的塌落使内外柱失去侧向支撑,柱的计算长度增大,使柱的承载力再次降低,当框架柱的承载力不足以抵抗其荷载效应时,结构上部坍塌,继而发生整体结构倒塌。

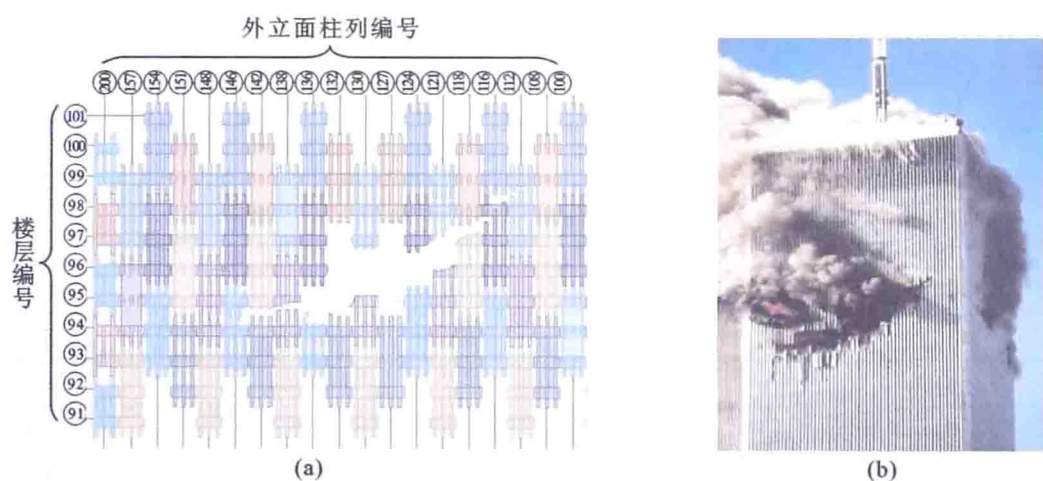


图 1-1 飞机撞击 WTC 大楼导致的外立面竖向结构破坏



图 1-2 飞机撞击 WTC 大楼后引发的火灾

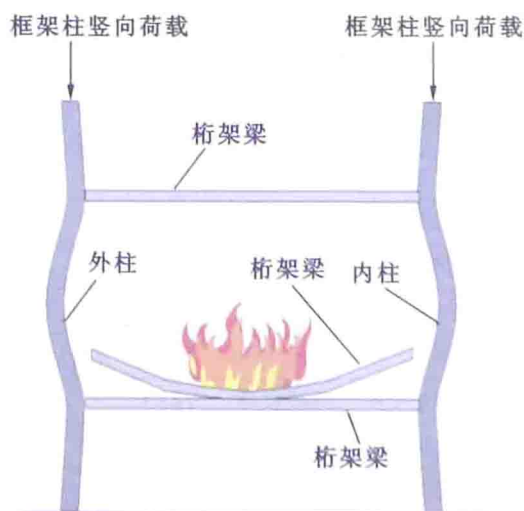


图 1-3 火灾下 WTC 大楼桁架梁的坍塌

2005 年 2 月 12 日西班牙马德里的 Windsor Tower 大楼(图 1-4)发生火灾。该建筑共 32 层,106 m 高,钢筋混凝土核心筒结构。结构内部核心筒为混凝土,外部为钢结构梁、柱(图 1-5),大楼原本无被动防火保护,无喷淋系统,钢柱无防火保护层。火灾发生时,正在进行工期为 3 年的重装修施工,对外围钢柱采用防火板进行保护,钢梁喷涂薄型防火涂料,并增加喷淋系统,17 层以下楼层基本完成防火保护施工,楼层之间的缝隙还未全部密封处理,竖向交通之间的防火门也未全部安装好。如图 1-6 所示,火灾使 17 层以上结构除了核心筒及附近区域外,周边楼板全部垮塌,17 层以下的结构保留了完整性。



图 1-4 Windsor Tower 大楼

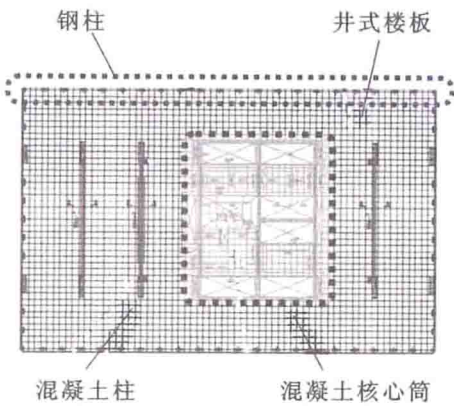


图 1-5 Windsor Tower 大楼结构平面



图 1-6 火灾后的 Windsor Tower 大楼

中国现存古建筑多为木结构,如图 1-7 所示,建于 1405 年的南京明孝陵建筑群中的方城明楼木屋盖,在 1853 年火灾中烧毁,仅遗存砖石墙体。后于 2008 年,采用钢桁架结构外饰木构件重建明代形制屋顶对遗存墙体进行保护,如图 1-8 所示。



图 1-7 明孝陵方城明楼屋顶毁于火灾



图 1-8 明孝陵方城明楼屋顶修复后

大跨度建筑屋盖大多采用钢结构,其在火灾中易受到破坏。表 1-4 列举了我国一些建筑物的钢结构屋盖在火灾中倒塌的实例。

表 1-4 钢结构屋盖火灾倒塌实例

建筑名称	结构类型	火灾日期	破坏情况
重庆天原化工厂	钢屋架	1960-02-18	20 min 倒塌
上海文化广场	钢屋架	1969-12	倒塌
天津市体育馆	钢屋架	1973-05-05	19 min 倒塌
长春卷烟厂	钢木屋架	1981-04-05	倒塌
北京友谊宾馆剧场	钢木屋架	1983-12	20 min 倒塌
唐山市棉纺织厂	钢梁	1986-02-08	20 min 倒塌
北京高压气瓶厂	钢屋架	1986-04-08	倒塌
江油电厂俱乐部	钢屋架	1987-04-21	20 min 倒塌

此外,还有多起火灾中整体结构倒塌的实例。1993年福建泉州一座钢结构冷库发生火灾,造成 3600 m^2 的库房倒塌;1996年江苏省昆山市一轻钢结构厂房发生火灾, 4320 m^2 的厂房烧塌;1998年北京某家具城发生火灾,造成该建筑(钢结构)整体倒塌;2001年台北东方科学园区一幢高层钢结构建筑发生火灾,造成严重破坏,包括梁柱连接断裂(图1-9)、梁局部屈曲变形(图1-10)、梁整体挠曲变形(图1-11)及楼板大挠曲变形(图1-12);2003年上海某钢结构厂房发生火灾,造成整体结构倒塌(图1-13、图1-14)。



图 1-9 火灾引起柱连接断裂



图 1-10 火灾引起梁局部屈曲



图 1-11 火灾引起梁整体挠曲变形



图 1-12 火灾引起楼板大挠曲变形



图 1-13 火灾中倒塌的钢结构厂房



图 1-14 火灾中钢构件严重变形

2003年衡阳“11·3”大火,1楼底层为框架,2层以上为砖混结构的8层建筑在火灾中坍塌(图1-15),造成20人死亡、16人受伤的严重火灾。2009年2月9日21时许,如图1-16所示,在建的央视文化中心由于燃放烟花引发火灾。该楼的主体结构为钢与混凝土组合结构,外立面加饰了一层钢网架,网架的外层是防水和保温层,保温层材料为易燃材料,致使大楼的外立面网架结构被迅速包裹在大火之中。火灾持续6小时,造成一名消防人员牺牲,多名人员受伤,外部钢网架严重受损(图1-17)。这些火灾造成的经济损失和社会影响难以估量。



图 1-15 衡阳 8 层砖混结构建筑坍塌



图 1-16 央视配楼大火



图 1-17 火灾引起外部钢网架严重受损

1.2 建筑火灾安全的主要范畴



火灾造成的影响是多方面的,有人员的伤亡、财产的损失,还有建筑的损伤及恶劣的社会影响。火灾造成人员伤亡的方式主要是人员吸入烟或有毒的气体;在一些情况下,人员被困在燃烧的建筑内得不到救援