



高性能混凝土结构防火设计原理

Fire Safety Design Principle of High-performance Concrete Structures

肖建庄 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

高性能混凝土结构抗火 设计原理

Fire Safety Design Principle of High-performance Concrete Structures

肖建庄 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

混凝土高性能化是今后结构混凝土发展的必然趋势,而防火是土木工程防灾的一个重要分支。本书以高性能混凝土结构为主要研究对象,结合多年来的科研成果及国内外文献的梳理与分析,针对高性能混凝土结构火灾反应、抗火性能及火后评价等,力图建立高性能混凝土结构抗火设计基本原则和方法。本书共 10 章,第 1~3 章介绍结构抗火设计基础知识和方法;第 4~7 章介绍高性能混凝土材料高温力学性能及高性能混凝土构件与结构的火灾反应规律;第 8、9 章介绍高性能混凝土结构抗火设计原则及火后检测与加固特点;第 10 章介绍高性能混凝土结构火风险分析。

本书可作为高等院校土木工程专业师生的参考教材,也可供从事混凝土结构抗火研究、设计和管理的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高性能混凝土结构抗火设计原理/肖建庄著. —北京:科学出版社,2015. 10
ISBN 978-7-03-045294-8

I. ①高… II. ①肖… III. ①高强混凝土—混凝土结构—防火—结构设计 IV. ①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 177531 号

责任编辑:刘宝莉 张晓娟 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 10 月第一次印刷 印张:18

字数:363 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在危害土木工程的诸多灾害中,火灾是最常见、最危险和最具毁灭性的灾害之一。高温(火灾)对结构材料性能有显著影响,因此火灾极易造成材料劣化、构件损伤、结构破坏甚至倒塌。国内外混凝土结构火灾倒塌事故造成了巨大的人员伤亡和财产损失。我国在混凝土结构抗火方面,尚无系统的设计理论可循,不能适应土木工程可持续发展的需要。因此,如何合理地进行混凝土结构抗火设计已越来越受到学术界和工程界的关注,混凝土结构抗火理论及其工程应用技术研究正成为结构工程领域一个研究热点,这种趋势在美国“9·11”事件后尤其明显。

混凝土结构抗火是一门综合性很强的边缘交叉技术学科,涉及火灾科学、消防工程学、建筑材料学、工程热物理学、结构工程学等学科领域,其研究的主要目标在于不断提高对建筑火灾特性及其对结构影响的认识,建立结构抗火理论和设计方法,为减轻火灾损失提供经济合理和有效的技术措施。

1905年巴尔的摩大火后,美国材料与试验协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)提出板、墙等构件的火灾试验方法。直到20世纪40年代,国际上才开始重视混凝土结构的抗火研究。许多国家相继成立了抗火研究协会,并开展了一系列的国际合作。特别是美国硅酸盐水泥协会与加拿大国家研究院联合执行了一个规模庞大的混凝土柱抗火研究计划,对钢筋混凝土柱的抗火性能进行了系统的试验与理论研究。基于大量试验研究及理论分析,苏联、美国、瑞士、加拿大、法国都专门编制了钢筋混凝土结构抗火设计规范。混凝土结构抗火从研究阶段步入工程实用阶段。

我国对混凝土结构抗火性能研究起步较晚。20世纪60年代冶金部建筑研究总院等单位开始着手混凝土材料高温力学性能的试验研究;公安部所属的消防研究所对建筑物的耐火等级以及建筑构件的耐火极限进行研究,这些研究均局限在单独构件抗火的试验阶段,而少有涉及整体结构抗火性能方面研究以及简化设计方法的探索。20世纪80年代中期开始,同济大学、清华大学、西南交通大学等单位使用自行研制的高温试验设备,对高温下、高温后钢筋和混凝土的本构模型、构件和结构的高温反应以及灾后评估修复等方面进行了大量的试验研究与理论分析,并编制了有限元程序,取得了较为丰硕的研究成果。但是,以往的研究主要是针对普通混凝土展开的,而近年来以高强度、高工作性和高耐久性为特征的高性能混凝土蓬勃发展,对高性能混凝土材料高温性能和结构抗火性能的研究还不够充分和系统。

本书较为系统地总结了作者近十年来,在国家 973 项目(2012CB719703)、863 项目(2001AA504000、2004AA33G050)、国家自然科学基金项目(51325802、50108011)和高等学校骨干教师资助项目(1199)等的支持下,围绕 C60~C100 高性能混凝土完成的材料高温性能和结构抗火性能的研究工作,这些研究工作是由我和研究生们共同完成的。为使读者对混凝土结构抗火有较为系统的了解,本书还介绍了本领域内其他学者的研究进展和部分成果。本书分为 10 章,先后分别介绍了建筑防火与结构抗火的关系、一般建筑室内火灾的特征与事故统计、结构抗火研究方法与设计原则、混凝土和钢筋材料的高温力学性能、高温后高性能混凝土骨料咬合性能试验与分析、高温后高性能混凝土与钢筋间的黏结滑移性能、高性能混凝土结构火灾反应与抗火性能、高性能混凝土结构抗火概念设计与计算设计、高性能混凝土结构火后性能检测与加固以及高性能混凝土结构火风险分析。

由于作者认识水平和理论分析的能力有限,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

肖建庄

2014 年 12 月于同济大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 火灾分类	1
1.2 火灾灾害	1
1.2.1 烟气运动	2
1.2.2 传热	3
1.3 建筑防火与结构抗火	4
1.3.1 建筑防火	4
1.3.2 结构抗火	5
参考文献	6
第 2 章 一般建筑室内火灾	7
2.1 建筑火灾的发生过程	7
2.1.1 火灾发生的条件	7
2.1.2 建筑火灾的发展过程	7
2.1.3 建筑火灾严重性的影响因素	8
2.2 建筑室内火灾场景模拟	9
2.2.1 网络模型	10
2.2.2 区域模型	10
2.2.3 场模型	11
2.2.4 复合模型	11
2.2.5 经验模型	12
2.3 升温曲线	16
2.3.1 标准升温曲线	16
2.3.2 等效爆火时间	18
2.4 火灾统计	19
2.4.1 国内火灾统计	20
2.4.2 国外火灾统计	22
2.5 小结	24
参考文献	24

第3章 高性能混凝土结构抗火研究方法	27
3.1 模型试验研究	27
3.1.1 国内外结构抗火试验室现状	27
3.1.2 混凝土构件的标准耐火试验	33
3.1.3 混凝土构件和结构抗火试验研究	40
3.2 理论分析研究	45
3.2.1 混凝土结构抗火理论研究的基础	46
3.2.2 混凝土结构抗火理论研究的进展	46
3.2.3 数值模拟与计算机仿真	50
3.3 混凝土结构抗火设计原则	50
3.3.1 防火设计的基本要求	50
3.3.2 防火设计极限状态	51
3.3.3 防火设计主要变量与模型	51
3.3.4 防火设计一般流程	52
3.4 小结	53
参考文献	53
第4章 混凝土和钢筋材料的高温力学性能	57
4.1 高温对混凝土的损伤	57
4.1.1 损伤机理与主要试验方法	57
4.1.2 经历温度与损伤演化关系	60
4.1.3 持续时间与损伤演化关系	60
4.1.4 恢复时间与损伤关系	60
4.2 高温中混凝土材料的力学性能	61
4.2.1 混凝土的强度	61
4.2.2 混凝土的弹性模量	63
4.2.3 混凝土的本构关系	64
4.3 高温后混凝土材料的力学性能	66
4.3.1 混凝土的强度	66
4.3.2 混凝土的弹性模量	67
4.3.3 混凝土的本构关系	68
4.4 高性能混凝土材料的高温力学性能	68
4.4.1 高性能混凝土	68
4.4.2 高性能混凝土的高温爆裂	69
4.4.3 高性能混凝土高温力学性能	70
4.4.4 高性能混凝土组分对抗火性能的影响	76

4.5 高温中与高温后钢筋的力学性能	76
4.5.1 高温中钢筋的力学性能	77
4.5.2 高温后钢筋的力学性能	82
4.6 小结	83
参考文献	83
第5章 高温后高性能混凝土骨料咬合性能	88
5.1 骨料咬合作用	88
5.1.1 机理	88
5.1.2 影响因素	88
5.2 试验设计	89
5.2.1 材料	89
5.2.2 试件设计	90
5.2.3 升温制度与温度场	91
5.2.4 加载方式	95
5.2.5 剪切面细观结构观察	96
5.3 试验结果	97
5.3.1 剪切强度与剪切位移分析	97
5.3.2 剪切强度与抗压强度关系式	101
5.4 骨料咬合机理分析	102
5.4.1 剪切面细观分析	102
5.4.2 高温后高性能混凝土骨料咬合退化机理分析	107
5.5 小结	108
参考文献	109
第6章 高温后高性能混凝土与高强钢筋间黏结滑移性能	111
6.1 高温中与高温后普通混凝土和钢筋的黏结滑移性能	111
6.1.1 高温中的黏结性能	111
6.1.2 高温后的黏结性能	112
6.2 高温后高性能混凝土和高强钢筋黏结拔出试验	114
6.2.1 试验设计	114
6.2.2 试验结果	116
6.3 高温后高性能混凝土和高强钢筋黏结梁式试验	121
6.3.1 试验设计	121
6.3.2 试验结果	128
6.4 小结	135
参考文献	135

第 7 章 高性能混凝土结构火灾反应与抗火性能	137
7.1 外观反应	137
7.1.1 颜色	137
7.1.2 爆裂	138
7.1.3 失重	138
7.2 热反应一般性知识	139
7.2.1 材料的高温热工性能	139
7.2.2 传热学基本知识	146
7.2.3 热传导方程	147
7.2.4 温度场的理论分析	150
7.3 内力反应基本特征	151
7.3.1 高温中超静定结构的内力重分布	151
7.3.2 高温中与常温中内力重分布的区别	152
7.4 高性能混凝土深梁火灾反应	153
7.4.1 试验设计	153
7.4.2 外观反应	154
7.4.3 温度反应	156
7.5 高性能混凝土框架火灾反应与抗火性能	157
7.5.1 试验设计	158
7.5.2 外观反应	161
7.5.3 温度与变形反应	163
7.5.4 抗火性能评价	171
7.6 C50 高性能混凝土剪力墙火灾反应与抗火性能	172
7.6.1 试验设计	172
7.6.2 外观反应	175
7.6.3 温度与变形反应	176
7.6.4 内力反应	180
7.6.5 抗火性能评价	181
7.7 C100 高性能混凝土剪力墙火灾反应与抗火性能	182
7.7.1 试验设计	182
7.7.2 外观反应	187
7.7.3 温度与变形反应	189
7.7.4 抗火性能评价	195
7.8 小结	196
参考文献	196

第 8 章 高性能混凝土结构抗火设计	199
8.1 概念设计	199
8.1.1 材料选择	199
8.1.2 截面选择	200
8.1.3 保护层与覆盖层	201
8.1.4 结构体系选择	204
8.2 计算设计	209
8.2.1 火灾下混凝土结构的极限状态	209
8.2.2 混凝土结构抗火设计要求	210
8.2.3 火荷载及其组合	211
8.2.4 抗火设计时抗力取值及其组合	212
8.3 高性能混凝土梁截面抗火设计	213
8.3.1 基本假定	213
8.3.2 等效截面法	213
8.3.3 计算公式	214
8.4 高性能混凝土柱抗火设计实例	217
8.4.1 实例介绍	217
8.4.2 抗火设计	221
8.5 小结	222
参考文献	222
第 9 章 高性能混凝土结构火后性能与检测	225
9.1 检测与评定	225
9.1.1 火灾现场勘察	225
9.1.2 结构与材料受损程度检测与评定	228
9.2 高性能混凝土深梁高温后受力性能	235
9.2.1 试验设计	235
9.2.2 抗剪试验结果与分析	236
9.2.3 高温后深梁抗剪承载力计算分析	239
9.3 高性能混凝土框架火后抗震性能	240
9.3.1 试验设计	240
9.3.2 试验结果	241
9.3.3 试验分析	243
9.4 C50 高性能混凝土剪力墙火后抗震性能	250
9.4.1 试验设计	250
9.4.2 试验结果	251

9.4.3 试验分析	254
9.5 修复与加固	258
9.5.1 主要修复方法	258
9.5.2 主要加固方法	260
9.6 C100 高性能混凝土剪力墙火后修复试验	262
9.6.1 试验设计	262
9.6.2 试验结果与分析	263
9.7 小结	267
参考文献	268
第 10 章 高性能混凝土结构火风险分析	269
10.1 高性能混凝土结构火风险	269
10.2 风险模型与评价	270
10.3 小结	273
参考文献	273
索引	275
致谢	277

第 1 章 绪 论

1.1 火灾分类

火是人类得以生存、赖以发展的自然馈赠。但火灾是发生最频繁且极具毁灭性的灾害之一,火一旦失去控制就会蔓延成灾,造成不可估量、无法挽回的损失,严重威胁人类的安全、生存和发展。自古以来,火灾使人类蒙受巨大损失,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]。

火灾类型有建筑火灾、工业生产设备火灾、森林火灾、交通工具火灾等。在各类火灾事故中,建筑火灾是最常见、最危险、对人类生命和财产造成损失最大的火灾,约占全部火灾的 80%。

1.2 火灾灾害

尽管近年来科技的发展使人们对火灾的预测、防护水平有所提高,但灾难性事故仍时有发生。仅 2013 年,美国发生 124 万起火灾,造成 3240 人丧生和 115 亿美元的经济损失。其中建筑火灾 48.75 万起,直接经济损失达 95 亿美元。在我国,2013 年统计火灾 38.8 万起,死亡 2113 人,受伤 1637 人,直接财产损失 48.5 亿元,建筑火灾 26.015 万起,直接经济损失 38.9 亿元,分别占总起数和总直接损失的 67%和 80%^[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的影响,建筑结构在火灾中严重破坏甚至倒塌的情况屡有发生,因此火灾及其防护必然成为科技工作者和工程技术人员不可回避的一个重要研究领域。

一般而言,钢筋混凝土结构的抗火性能优于钢结构和木结构。但若抗火设计不当,也会造成严重后果。例如,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 1.1)。2004 年 12 月 21 日 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,大火造成 69 人受伤,直接经济损失上亿元(图 1.2)。2009 年 2 月 9 日晚,在建的中央电视台电视文化中心(北配楼)发生特大火灾,大火造成 1 名消防战士牺牲、

多人受伤,造成直接经济损失 1.6 亿元。2010 年 11 月 15 日 14 时,上海余姚路胶州路一栋高层公寓起火,大火导致 58 人遇难,另有 70 余人受伤。2015 年 1 月 2 日下午,哈尔滨一仓库发生大火,22 时突然发生塌方,导致 5 名消防员殉职。



图 1.1 湖南衡阳特大火灾现场



图 1.2 湖南常德桥南市场火灾现场

事实上,火灾燃烧过程所释放的热能,一部分会被房间的四壁所吸收,而更大的一部分却通过对流和辐射被传播到其他空间中。例如,火可以通过外墙板蔓延到其他建筑物上,也可以在对流和压力场作用下,使燃烧生成物在建筑物内的水平与垂直通道上迅速蔓延,且在垂直方向蔓延的速度要比水平方向快很多。这就解释了为什么在建筑火灾中,失火层的损失往往要小于上一层的损失。由此,我们有必要探讨火灾中的两个重要的物理现象:烟气运动与传热。

1.2.1 烟气运动

在建筑物中,火灾发生时引起烟气运动的主要途径有烟囱效应、浮升力、膨胀力、风压和空调系统等^[3]。

1. 烟囱效应

建筑物室内外空气通常都存在温差,当室外空气温度低于室内空气温度时,在建筑物的竖井中(如楼梯间、电梯井、管道井、空调垂直风道等)的空气就会向上运动,这种现象称为烟囱效应。对高层建筑而言,在室内外空气温度差较大时,其烟囱效应更为明显。当室外空气温度高于室内空气温度时,在建筑物的竖井中的空气就会向下运动,这种现象称为逆烟囱效应。

在竖井内、外静压相等的未知面称为中性面,一般在建筑物的中间位置^[4]。建筑物在烟囱效应或逆烟囱效应作用下,空气的运动方式如图 1.3 所示。在烟囱效应下,若着火点位置位于中性面之下,烟气则会迅速地向建筑物上部蔓延;若着火点位置位于中性面之上,烟气则会向上一层蔓延,这时在中性面之下部位会比较安全,不会受到烟气的侵害。在逆烟囱效应作用下,烟气运动的方向则与上述

相反。

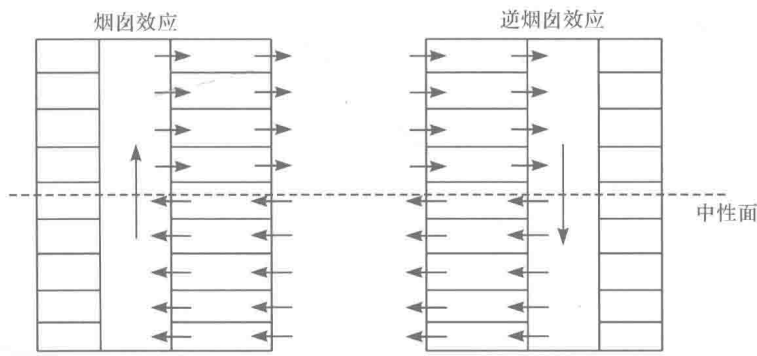


图 1.3 烟囱效应或逆烟囱效应作用下空气的运动方向

2. 浮升力

火灾时高温烟气在建筑内部的运动存在向上的浮升力,从而导致烟气沿建筑物内部向上蔓延,随着烟气的流动和烟气浓度被稀释,浮升力的作用会逐渐减小。浮升力的大小与着火处周围的空气温度有关。

3. 膨胀力

除浮升力外,火灾能量的释放还可使周围的空气体积快速膨胀,空气膨胀量的大小与着火温度及周围环境温度有关。

4. 风压

许多情况下,室外风对建筑物内的烟气运动会产生较大的影响。

5. 空调系统

建筑物内的中央空调系统给人们的工作、生活创造舒适的环境条件,但火灾发生时烟气却可借助空调系统的送、回风管道在建筑物内蔓延,给居住在建筑物内的人员带来危害。此外,若空调系统对着火区域送风,还会起到助燃作用,增加火势。因此,当建筑物发生火灾时应立即关闭所有空调系统,以避免烟气在建筑物内更广泛传播。

1.2.2 传热

自然界中会经常出现热的传递问题。热力学第二定律指出,哪里有温差,哪里就有热量的传递,而且热量总是自发地由高温物体传向低温物体。由流动着的

烟气所实现的热量转移,在火灾中扮演了重要的角色。火灾中的传热是一种非常复杂的物理现象,这主要是因为存在着高温、不明显的瓦斯、大量水蒸气等现象,当然,还因为其排放时所具有的快速可变特征。传热可分为辐射、对流和传导三种模式^[5]:辐射传热是以电磁波的形式把热由一个物体传向另一个物体的现象;对流传热是指依靠流体的运动,把热量由一处传递到另一处的现象;传导是指物体各部分无相对位移或不同物体直接接触时依靠分子、原子及自由电子等微观粒子热运动而进行的热量传递现象。需要指出的是,火灾中的传热并非是以某一种传热方式单独进行的,而总是以辐射、对流、传导这三种方式综合作用进行的。

当某一室内发生火灾时,着火体便向四周进行热辐射,并向周围空气进行导热。可燃物周围的火焰附近温度最高,远处的温度略低,同时,热气流上浮,产生对流,转移热量。由于着火体的热辐射和室内空气温度的升高,使外围护墙、地板、顶棚等构件表面的温度升高,热量便由室内向室外低温处流动,如图 1.4 所示。

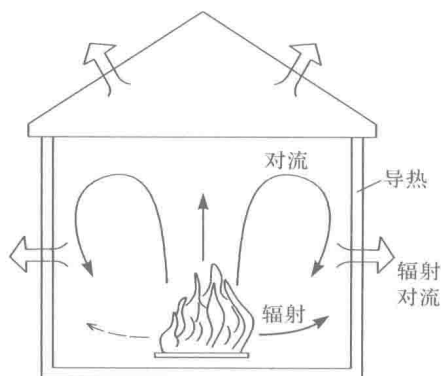


图 1.4 火灾中的传热

1.3 建筑防火与结构抗火

建筑结构防火从设计上来讲,可以分为建筑防火和结构抗火两个方面。

1.3.1 建筑防火

人类在同建筑火灾斗争中表现的智慧、积累的经验教训构成了建筑消防历史文化。在我国古籍中,就有关于春秋战国时期的消防行政管理和防火、灭火技术等多方面的文字记载,随后,人类才开始从建造过程中注意建筑的防火;但直到近千年以后,才开始真正意义上的建筑火灾研究。

建筑防火着重于从平面布局 and 材料选择等方面解决建筑物的防火问题。在

这一阶段应在规划、设计中做周密的考虑,以便把火灾隐患减少到最低的程度,并为一旦发生火灾创造扑救条件。我国《建筑设计防火规范》(GB50016—2014)^[6]从建筑物的耐火等级、层数、间距、通风、防火材料的选用、建筑构造、消防措施等方面给出了合理的规定,具体到民用建筑、工业厂房、高层建筑防火设计的各个环节,有效地起到了减少火灾损失的作用。

具体来讲,我国建筑防火设计主要考虑以下几个方面的技术问题^[3]:

- (1) 合理规划建筑布局,确定建筑物的耐火等级。
- (2) 划分建筑内的防火分区和防烟分区。
- (3) 确定各构件的耐火时间。
- (4) 划定避难通道,计算避难出口。
- (5) 设立防、排烟系统。
- (6) 加设自动报警、广播和疏散诱导系统。
- (7) 消火栓系统和自动灭火系统。
- (8) 建筑内装修的防火设计。

建筑防火设计是一个系统工程,它既要考虑各个部分的特殊性,又必须综合考虑整个系统的协调性,这就需要逐步做到整体优化,近年来发展起来的计算机模拟系统(消防疏散)为建筑防火设计提供了重要手段。

1.3.2 结构抗火

结构的功能为抵抗各种环境作用,如抵抗重力、抵抗风荷载(抗风)、抵抗地震(抗震)等。火作为一种环境作用,结构同样需要抵抗^[7]。

结构抗风与抗震是通过设计足够大的结构构件以抵抗由风或地震产生的结构内力来实现的,结构抗火也是如此。可以从两个途径进行研究^[8]:一是把火灾的高温作用等效为一种荷载,与结构上的其他荷载(恒载、活载、风载、地震作用等)一起参与荷载效应组合,按近似概率极限状态设计方法进行设计,即建立考虑或受高温作用的统一的结构设计方法;二是对已按常规方法完成设计的混凝土结构,进行抗火能力验算,以满足相应的抗火要求。

在抗火设计中,建筑结构应该满足的功能要求可概括为以下三个方面。

1. 承载能力要求

建筑结构应能承受正常施工和正常使用时可能出现的各种荷载和变形,在火灾发生时和发生后保持必需的整体稳定性,不致发生倒塌。

2. 分隔功能要求

建筑结构应该划分防火分区,有效地将火灾限制在某一区域内。设计中要保

证火灾中防火分区的分隔功能完好,主要体现在绝热性和完整性两个方面。

3. 可修复功能要求

在发生火灾的建筑物中,大部分混凝土结构并未失效或倒塌,经过一定的修复加固后仍可继续使用,这将产生巨大的经济效益。在设计中应该综合考虑经济性以及结构的重要性,保证结构具有相应的可修复性。

参 考 文 献

- [1] 范维澄,王清安,姜冯辉,等. 火灾学简明教程. 合肥:中国科学技术大学出版社,1995.
- [2] 公安部消防局. 中国火灾统计年鉴(2014 年版). 昆明:云南人民出版社,2014.
- [3] 李引擎,边久荣,熊洪,等. 建筑安全防火设计手册. 郑州:河南科学技术出版社,1998.
- [4] 许晓元. 高层建筑竖向通道中性面位置研究[硕士学位论文]. 合肥:中国科学技术大学,2011.
- [5] 章熙民,任泽霏. 传热学(第四版). 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑设计防火规范(GB 50016—2014). 北京:中国计划出版社,2014.
- [7] 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,2005.
- [8] 范进,吕志涛. 混凝土结构抗火研究的主要内容. 建筑技术,1999,30(5):319—320.