

杜红秀 著

钢筋混凝土结构

火灾损伤检测 及评估新方法

GANGJIN HUNNINGTU JIEGOU
HUOZAI SUNSHANG
JIANCE JI
PINGGU
XINFANGFA

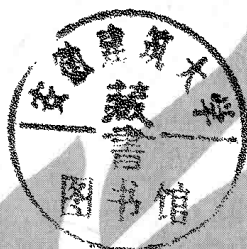


化学工业出版社

杜红秀 著

钢筋混凝土结构 火灾损伤检测 及评估新方法

GANGJIN HUNNINGTU JIEGOU
HUOZAI SUNSHANG
JIANCE JI
PINGGU
XINFANGFA



化学工业出版社

· 北京 ·

本书在概述钢筋混凝土火灾损伤特性的基础上,介绍了钢筋混凝土火灾损伤的几种非破损检测技术和分析模型,包括钢筋混凝土火灾损伤红外热像诊断理论与方法、钢筋混凝土火灾损伤电化学诊断理论与方法、钢筋混凝土火灾损伤超声波诊断理论与方法、混凝土构件截面温度场数值模拟,并给出了钢筋混凝土结构火灾损伤的综合诊断与评估方法。

本书可供土木建筑、工程材料等专业的科研人员与工程技术人员参考,也可供大专院校的教师、研究生及高年级本科生阅读使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

钢筋混凝土结构火灾损伤检测及评估新方法/杜红秀
著. —北京:化学工业出版社, 2017. 11
ISBN 978-7-122-30862-7

I. ①钢… II. ①杜… III. ①钢筋混凝土结构-建筑火灾-损伤(力学)-检测 ②钢筋混凝土结构-建筑火灾-损伤(力学)-评估 IV. ①TU370.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 254662 号

责任编辑:韩霄翠
责任校对:宋 玮

文字编辑:陈 雨
装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:三河市延风印装有限公司
710mm×1000mm 1/16 印张18 彩插2 字数367千字 2018年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:98.00 元

版权所有 违者必究

火灾是发生频率最高且极具毁灭性的灾害之一，而发生次数最多、损伤最严重的当属建筑火灾。由于自然或人为的原因引发的各种偶然性建筑火灾事故，使钢筋混凝土结构在短时间内承受高温作用，1h内可达 1000°C 或者更高。结构遭受高温作用后，材料性能严重劣化，结构发生剧烈的内力重分布，使构件开裂、变形增大、承载力下降，甚至出现局部破损或倒塌，导致巨大的经济损失，甚至造成人员伤亡。

钢筋混凝土结构的火灾损伤是极其复杂的，火灾后，如何准确而迅速地检测评估其损伤程度是工程实践中亟待解决的实际问题，它关系到能否制定科学合理的修复加固措施，以最大限度地减少火灾损失，避免修复加固过程中造成浪费。目前，混凝土结构火灾损伤评估基本是依赖工程技术人员的现场考察、经验评判，不能适应工程实际的需要。因此，探索和研究钢筋混凝土结构火灾损伤的检测评估理论和方法，对于全面正确地诊断评估钢筋混凝土结构火灾损伤状况，进而制定科学合理的修复加固措施，具有重要的理论意义和实用价值。

本书在综述钢筋混凝土高温力学性能的基础上，模拟火灾高温实验，研究了正日益广泛使用的C40、C60、C80高性能混凝土材料高温后各项物理力学性能，探讨了掺加聚丙烯纤维对高强、高性能混凝土高温性能的影响及其改善混凝土高温性能的作用。采用X射线CT技术及压汞等方法，对高性能混凝土火灾损伤内部微结构扫描分析，揭示了混凝土微结构劣化演化规律及机理；采用应变计和自制蒸汽压的试验装置，研究高强、高性能混凝土内部的热应力、蒸汽压以及与荷载耦合作用下随温度变化的规律及高温爆裂机理。通过试验测定了高性能混凝土的热工参数；根据传热学原理，采用数值方法模拟混凝土内部温度场；采用红外热像、电化学等无损检测新技术，建立模型推定混凝土表面受火温度和钢筋受火情况等；建立了钢筋混凝土结构火灾损伤检测评估的新方法；制定了钢筋混凝土火灾损伤诊断和损伤等级评估的标准，并给出了钢筋混凝土火

灾损伤综合诊断评估的方法和程序,可供工程实际应用。

全书共分10章,第1章钢筋混凝土高温(火灾)损伤,第2章高性能混凝土高温蒸汽压测试与模拟,第3章高性能混凝土高温热应变测试与模拟,第4章高性能混凝土微结构高温损伤,第5章混凝土结构火灾损伤评估与检测技术的发展,第6章混凝土火灾损伤红外热像诊断理论与方法,第7章钢筋混凝土火灾损伤电化学诊断理论与方法,第8章钢筋混凝土火灾损伤超声波诊断理论与方法,第9章混凝土构件截面温度场数值模拟,第10章钢筋混凝土结构火灾损伤的综合诊断与评估。

本书的编写工作得到了同济大学张雄教授、太原理工大学雷宏刚教授和太原科技大学秦义校教授等老师和同行的指导、鼓励和支持,在此深表谢意!

本书的研究工作得到2项国家自然科学基金项目(51478290、51278325)、2项山西省国家自然科学基金项目(2011011024-2、20041055)、1项山西省高校科技研究开发项目(2007115)等相关项目的资助。

本书的实验实施主要是在太原理工大学建工学院下辖的建筑材料与防灾研究所及土木工程实验中心建材实验室完成的,在此对建工学院全体同事、研究所全体同仁及土木工程实验中心全体工作人员深表谢意!特别感谢同事阎蕊珍博士攻读博士学位期间对本书的实验研究工作付出的辛勤劳动和鼎力协助。

本书的试验工作得到了本书作者名下全体研究生的辛勤付出和无私帮助,他们是李倩、史英豪、杜帆、闫昕、吴佳、张桥、刘改利、魏宏、姜宇、陈薇、陈良豪、丁明冬、吴慧萍、张琦、成聪慧、王飞剑、葛韦华、柴松华、金鑫、聂小青、张宁、郝晓玉、谢静、韩轶多、王慧芳、王妍、张伟、徐瑶瑶、张茂林、陈尧、张一帆,在此一并深表谢意!

由于专业知识、科研实践、工作能力和认识水平的差距及时间所限,本书存在诸多疏漏与不足,敬请专家、学者和同行批评指正。

杜红秀

2018年1月于太原

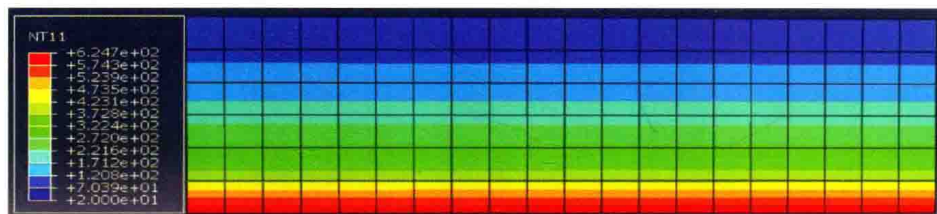


图3-32 混凝土板截面的温度场云纹图

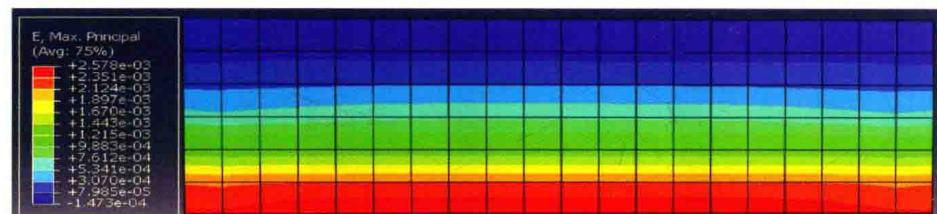


图3-33 混凝土板截面的热应变云纹图

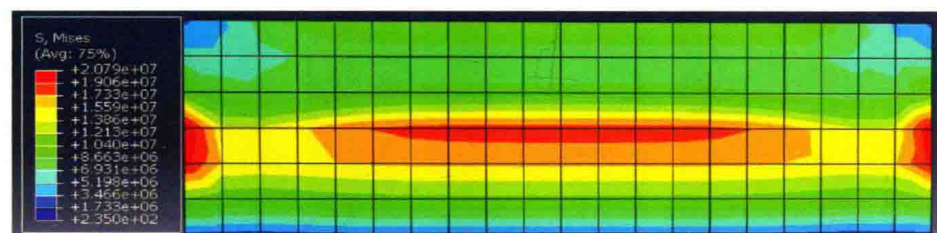


图3-34 混凝土板截面的热应力云纹图

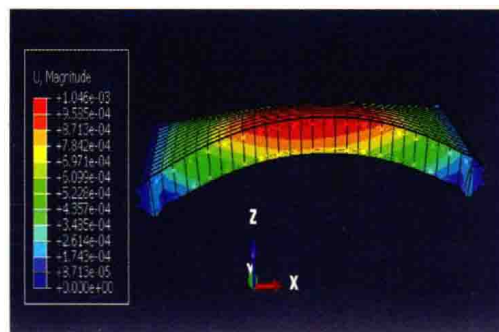


图3-39 混凝土板截面的位移云图

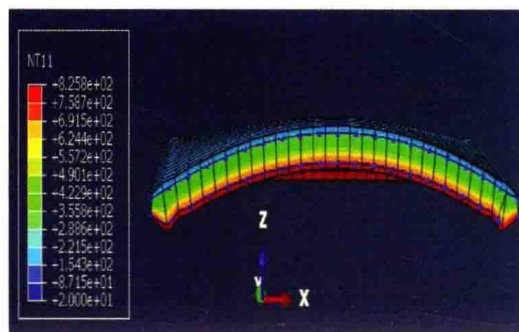


图3-40 混凝土板截面的温度云图

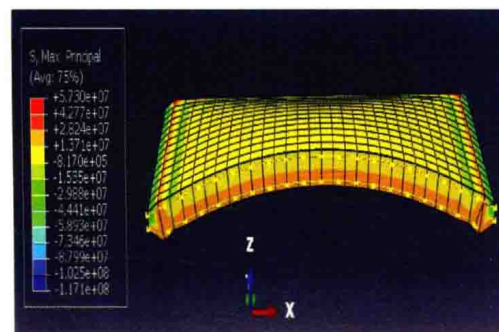


图3-41 混凝土板截面的热应力云图

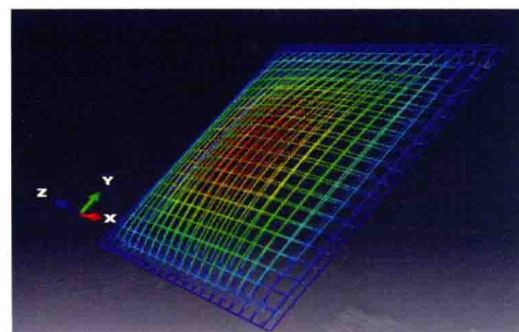


图3-42 钢筋网的位移云图

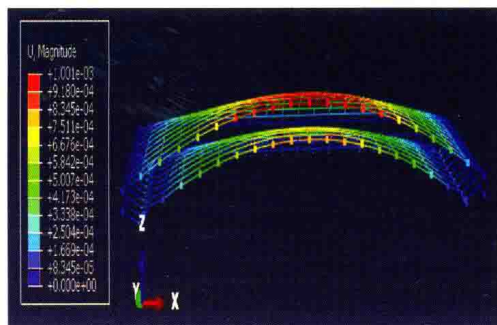


图3-43 钢筋网截面的位移云图

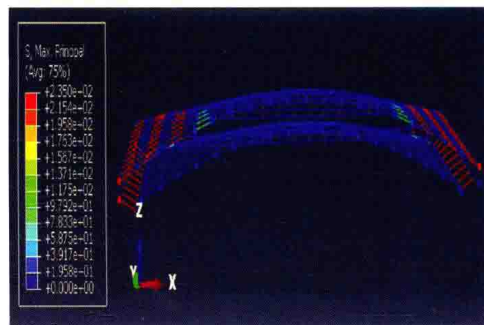
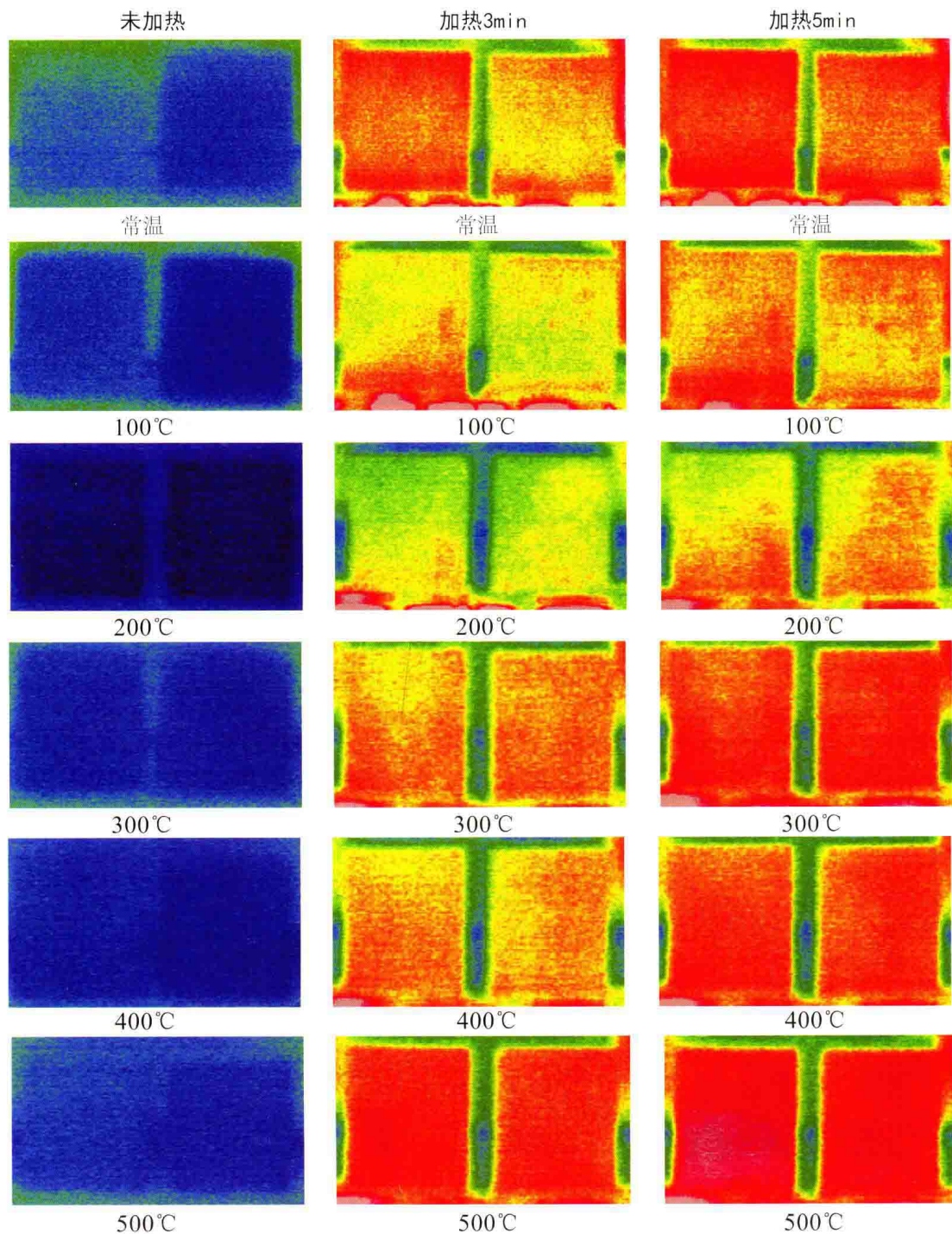


图3-44 钢筋网截面的热应力云图



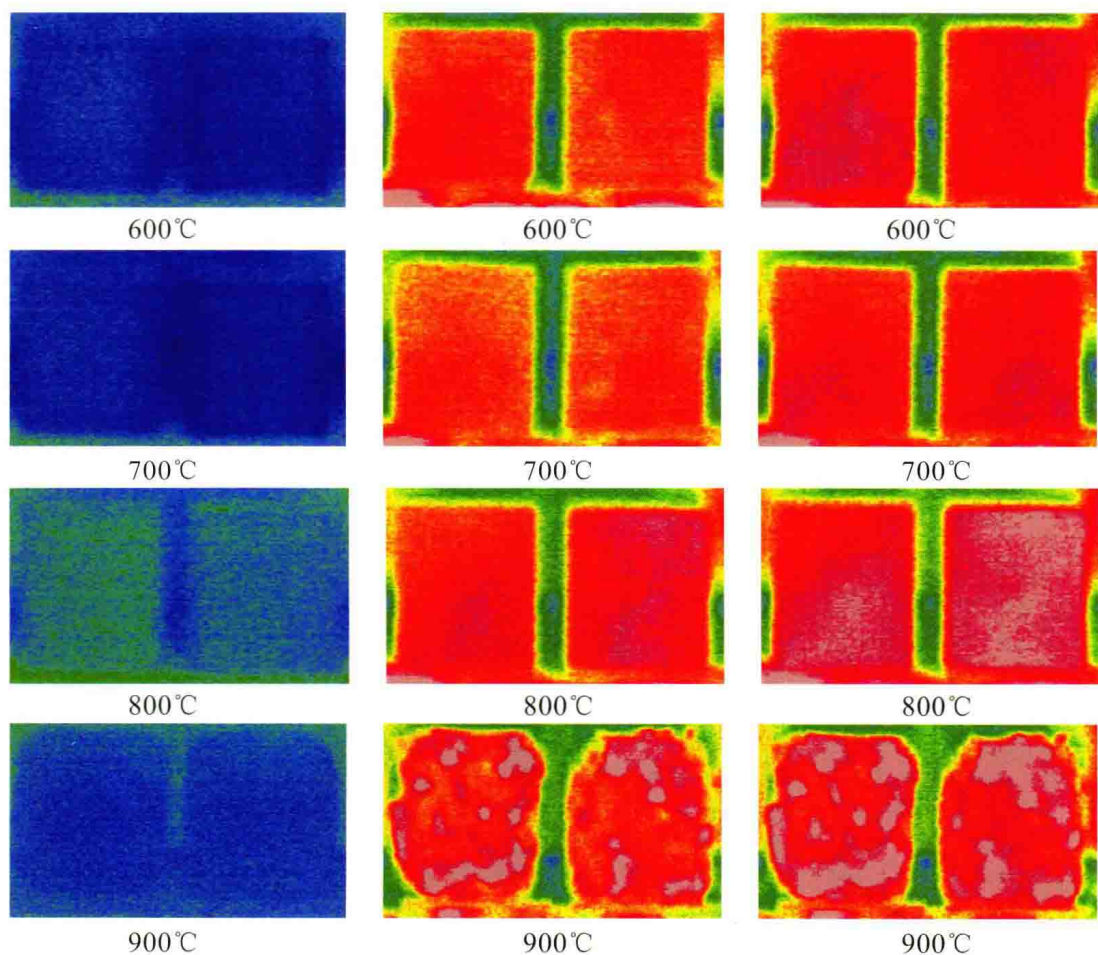


图6-3 混凝土立方体试块红外热像图

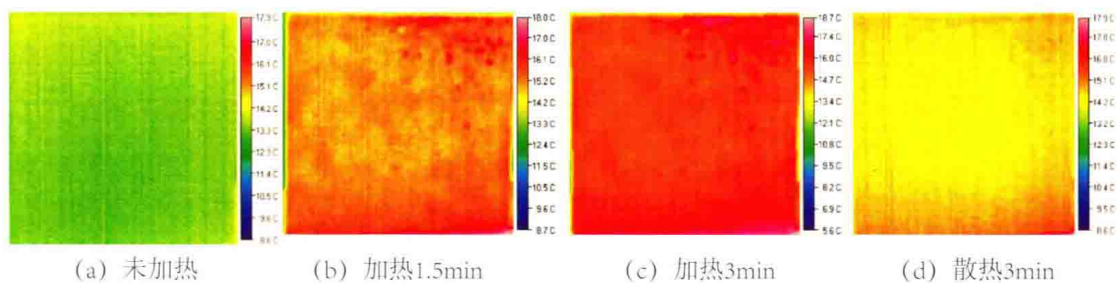


图6-11 不掺纤维HPC20°C时红外热像图

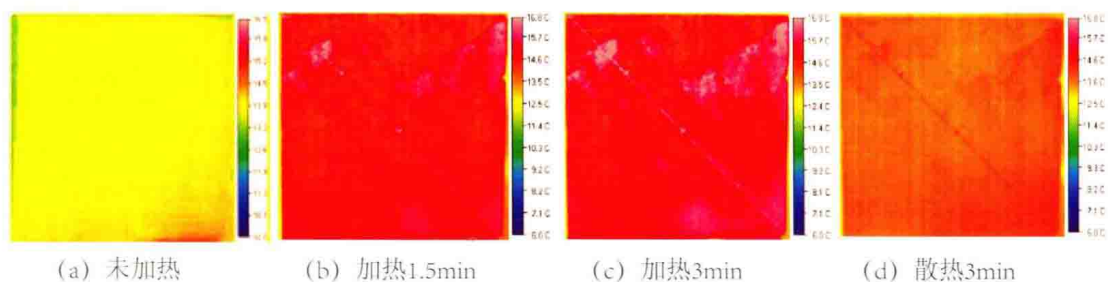


图6-12 不掺纤维HSC火灾温度300°C时红外热像图

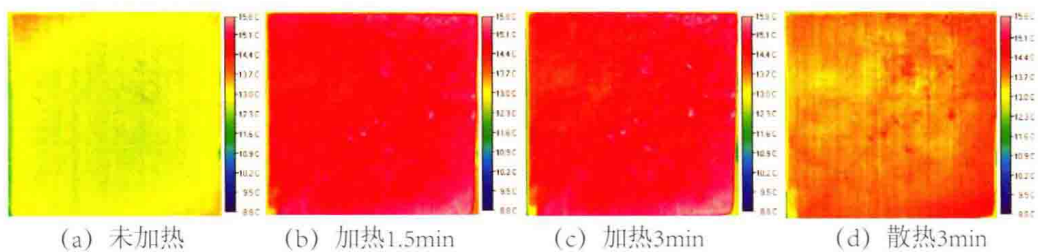


图6-13 不掺纤维HSC火灾温度500°C时红外热像图

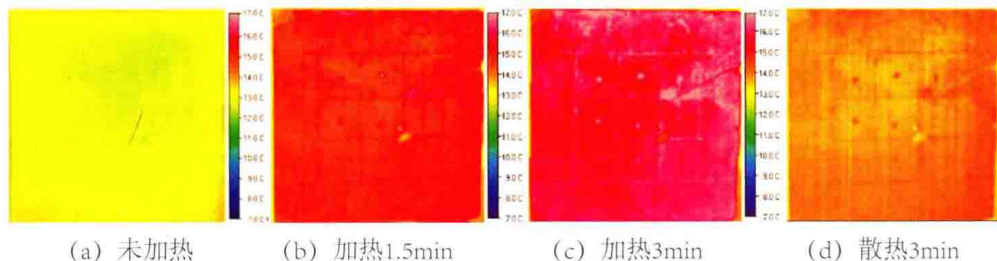


图6-14 不掺纤维HSC火灾温度700°C时红外热像图

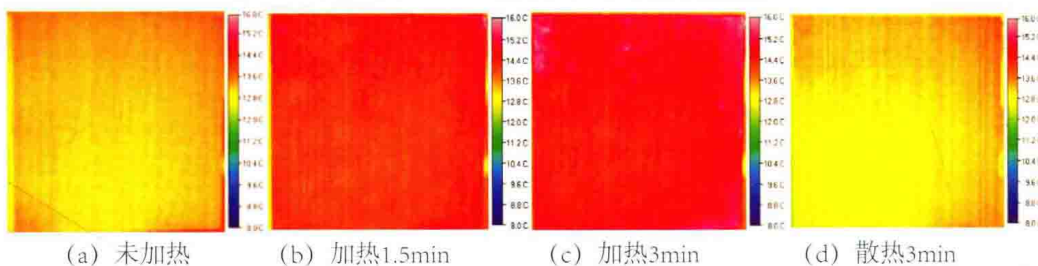


图6-17 掺1kg/m³纤维HSC火灾温度20°C时红外热像图

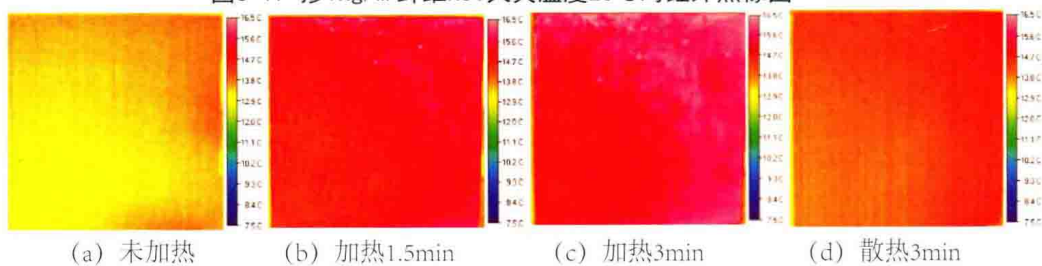


图6-18 掺1kg/m³纤维HSC火灾温度300°C时红外热像图

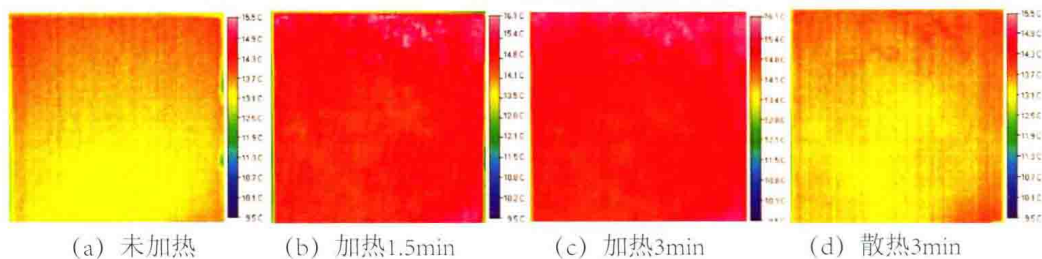


图6-19 掺1kg/m³纤维HSC火灾温度500°C时红外热像图

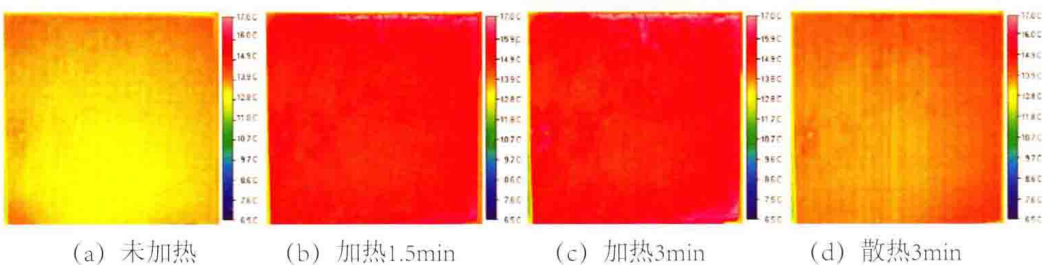


图6-20 掺1kg/m³纤维HSC火灾温度700°C时红外热像图

第1章 钢筋混凝土高温（火灾）损伤

1

1.1 建筑室内火灾特性	1
1.1.1 建筑室内火灾的发展过程和特性	2
1.1.2 影响火灾温度的因素	3
1.1.3 建筑材料的热效应	4
1.1.4 标准火灾温-时曲线	4
1.2 混凝土材料的热工性能	4
1.2.1 热导率 λ	5
1.2.2 比热容 c	7
1.2.3 表观密度 ρ	7
1.2.4 导温系数 α	7
1.3 普通钢筋混凝土的火灾损伤	8
1.3.1 火灾对普通混凝土性能的危害与损伤	8
1.3.2 火灾对钢筋力学性能的影响	12
1.3.3 火灾对钢筋与混凝土黏结力（强度）的影响	15
1.3.4 普通钢筋混凝土火灾损伤机理	17
1.4 高强混凝土/高性能混凝土的火灾（高温）损伤	19
1.4.1 火灾（高温）对高强混凝土/高性能混凝土强度的影响	20
1.4.2 火灾（高温）对高强混凝土/高性能混凝土刚度的影响	21
1.4.3 火灾（高温）对高强混凝土/高性能混凝土断裂能的影响	22
1.4.4 火灾（高温）对高性能混凝土/高强混凝土脆性的影响	23
1.4.5 重量损失 W	23
1.4.6 影响高强混凝土/高性能混凝土火灾（高温）性能的因素	24
1.4.7 高强混凝土/高性能混凝土的高温爆裂及消除爆裂	

的途径	25
1.4.8 高强混凝土/高性能混凝土的火灾损伤机理	28
1.5 高性能混凝土高温性能试验研究	28
1.5.1 原材料及混凝土配合比	28
1.5.2 高温对 C40 高性能混凝土物理力学性能的影响	29
1.5.3 高温对 C60 高性能混凝土物理力学性能的影响	41
1.5.4 高温对 C80 高性能混凝土物理力学性能的影响	49

第2章 高性能混凝土高温蒸汽压测试与模拟

57

2.1 混凝土高温爆裂及研究进展	57
2.1.1 混凝土高温爆裂机理	57
2.1.2 混凝土蒸汽压测试国内外研究现状	58
2.2 HPC 蒸汽压测试试验方案	59
2.2.1 试件制备	59
2.2.2 试验方法及装置	60
2.2.3 升温曲线	61
2.3 C60HPC 蒸汽压测试结果分析	62
2.3.1 试验现象	62
2.3.2 C60HPC 不加荷载作用下混凝土小板试验结果 与分析	63
2.3.3 明火与荷载耦合下混凝土大板蒸汽压结果与分析 ..	64
2.4 C80HPC 蒸汽压测试及结果分析	66
2.4.1 试验现象	66
2.4.2 温度对 C80HPC 混凝土板内部蒸汽压的影响	69
2.5 数值模拟与实测结果分析	77
2.5.1 温度数值模拟与实测结果分析	77
2.5.2 蒸汽压数值模拟与实测结果分析	78

第3章 高性能混凝土高温热应变测试与模拟

81

3.1 混凝土热应变试验	81
3.1.1 混凝土板制备	81
3.1.2 试验方法及装置	82
3.2 混凝土板热应变试验结果与分析	84
3.2.1 混凝土热应变随受火时间的变化规律	84
3.2.2 温度对混凝土热应变的影响	89
3.3 计算机模拟与分析	91
3.3.1 混凝土热应力模拟方法及步骤	91

3.3.2 基于 ABAQUS 的混凝土小板热应力分析	91
3.3.3 基于 ABAQUS 的混凝土大板热应力拓展分析	93

第 4 章 高性能混凝土微结构高温损伤 97

4.1 C40HPC 微结构高温损伤	97
4.1.1 C40HPC 微结构高温损伤 CT 试验	97
4.1.2 C40HPC 微结构高温损伤 CT 图像分析	98
4.1.3 C40HPC 微结构高温损伤压汞试验与分析	100
4.1.4 C40HPC 高温损伤扫描电镜分析	108
4.2 C60HPC 的微结构高温损伤	108
4.2.1 C60HPC 的 CT 扫描试验与分析	109
4.2.2 压汞试验研究与分析	116
4.2.3 C60HPC 的扫描电镜研究	127
4.3 C80 高性能混凝土微结构高温损伤	128
4.3.1 C80 高性能混凝土微结构高温损伤 CT 图像分析	128
4.3.2 高温对高性能混凝土内部细观裂纹发展的影响	133
4.3.3 温度-荷载共同作用下 C80 高性能混凝土微结构 CT 图像分析	136
4.3.4 C80 高性能混凝土高温损伤压汞试验与分析	137
4.3.5 高温对 HPC 微观形貌的影响	153

第 5 章 混凝土结构火灾损伤评估与检测技术的发展 157

5.1 钢筋混凝土结构火灾损伤评估研究进展	157
5.1.1 不同国家和地区对钢筋混凝土结构火灾损伤的 评估程序及损伤分级	158
5.1.2 现有火灾损伤评估方法优劣势分析	166
5.1.3 钢筋混凝土结构火灾损伤评估发展趋势	167
5.2 钢筋混凝土结构火灾损伤检测技术研究进展	168
5.2.1 传统混凝土结构火灾损伤检测方法	168
5.2.2 钢筋混凝土结构火灾损伤检测新技术	171
5.2.3 钢筋混凝土结构火灾损伤检测技术发展趋势	175

第 6 章 混凝土火灾损伤红外热像诊断理论与方法 177

6.1 混凝土火灾损伤红外热像检测分析理论与实验依据 ...	177
6.1.1 红外热像检测的基本原理	177
6.1.2 混凝土火灾损伤红外热像检测原理及依据	180

6.2 普通混凝土火灾损伤的红外热像检测分析模型	181
6.2.1 建模实验	181
6.2.2 红外热像特征分析及建模	183
6.3 高强、高性能混凝土火灾损伤红外热像检测分析	188
6.3.1 建模实验	188
6.3.2 红外热像特征分析及建模	189
6.4 混凝土火灾损伤的红外热像诊断与评估	195
6.5 混凝土火灾损伤红外热像检测技术规程	196

第7章 钢筋混凝土火灾损伤电化学诊断理论与方法 198

7.1 钢筋混凝土火灾损伤电化学分析理论依据	198
7.1.1 钢筋混凝土火灾损伤电化学检测分析理论依据	198
7.1.2 钢筋混凝土火灾损伤的电化学检测基本原理	199
7.2 钢筋混凝土火灾损伤电化学分析模型	201
7.2.1 建模实验	201
7.2.2 建立检测分析模型	203
7.3 钢筋混凝土火灾损伤的电化学诊断与评估	207
7.4 钢筋混凝土火灾损伤电化学检测技术规程	207

第8章 钢筋混凝土火灾损伤超声波诊断理论与方法 209

8.1 火灾混凝土损伤超声波检测分析理论依据	209
8.1.1 超声波在混凝土中的传播机理	209
8.1.2 超声场的基本物理量	211
8.1.3 超声波无损检测特征参量的变化	212
8.1.4 超声波检测混凝土缺陷的理论基础	212
8.2 火灾混凝土损伤超声波检测分析模型	214
8.2.1 建模实验	214
8.2.2 建模分析	216
8.2.3 高强、高性能混凝土超声无损检测及建模	219
8.3 混凝土火灾损伤超声波检测技术规程	220

第9章 混凝土构件截面温度场数值模拟 222

9.1 混凝土构件截面温度场数值计算	222
9.1.1 热传导微分方程	223
9.1.2 温度场的有限差分解法	224
9.1.3 混凝土构件截面温度场计算	228
9.2 构件截面温度场计算程序及其验证	230

9.2.1	计算程序的编制	230
9.2.2	温度场差分分析可视化软件介绍	231
9.2.3	实验验证	238
9.3	饰面层对构件内部温度场的影响	251

第 10 章	钢筋混凝土结构火灾损伤的综合诊断与评估	254
---------------	----------------------------	------------

10.1	钢筋混凝土结构火灾损伤的综合诊断与评估程序 ...	254
10.2	火灾现场勘察	254
10.2.1	初勘	255
10.2.2	复勘	260
10.3	综合诊断与评估	265
10.3.1	构件综合诊断与评估	265
10.3.2	综合诊断与评估的主要内容	266
10.3.3	综合诊断与评估标准	267

附录	268
-----------	------------

参考文献	273
-------------	------------

第1章

钢筋混凝土高温（火灾）损伤

随着社会经济和现代化建设的快速发展，高层建筑不断涌现，房屋密度不断加大，加之大量易燃新型材料的广泛应用以及燃气、电器的普遍使用，使建筑物发生火灾的概率大大增加，发生火灾造成的损失也与日俱增。

钢筋混凝土是现代建筑中大量使用的结构材料，由于自然或人为原因引发的各种偶然性建筑火灾事故，使钢筋混凝土结构在短时间内承受高温作用，1h内可达1000℃或者更高。结构遭受高温作用后，材料性能将会有不同程度的降低，从而导致结构构件或结构整体开裂、变形增大、承载力下降，甚至出现局部破损或倒塌，进而影响结构火灾或高温后的安全和使用。火灾后，如何准确而迅速地检测评估其损伤程度是工程实践中亟待解决的实际问题，它关系到能否制订科学合理的修复加固措施，以最大限度地减少火灾损失，避免修复加固过程中造成浪费。因此，探索和研究钢筋混凝土结构火灾损伤的检测评估理论和方法，对于全面正确地诊断评估钢筋混凝土结构火灾损伤状况，进而制订科学合理的修复加固措施，具有重要的理论意义和实用价值。

1.1 建筑室内火灾特性

处于火灾环境中的结构，其反应是从起火时就开始的。可燃物质一旦着火燃烧，释放出的热量经对流、辐射作用于结构表面，再由热传导传向结构内部，从而在结构内部形成一非均匀的温度场，即引起结构的温度反应；升温的结构材料发生一系列物理化学变化导致其力学性能的改变，使结构强度、刚度和变形能力发生变化而引起力学反应。各种钢筋混凝土构件是钢筋混凝土建筑物最基本的结构单元，研究高温作用下构件的温度场，分析构件内部经历的温度分布，了解火灾时构件内部温度变化的规律，有助于判定构件内部损伤程度、损伤疏松层厚度，可以为火灾

建筑物的鉴定评估和修复加固工程提供基础依据。为了进行结构构件的温度场分析计算,需先了解建筑室内火灾的特性和规律以及混凝土材料随温度变化的热工参数的情况。

1.1.1 建筑室内火灾的发展过程和特性

火的实质是可燃物质经过点火触发后,与空气中的氧气发生激烈作用而形成的一种燃烧现象。室内火灾常常是从某种可燃固体着火开始的,可燃物在燃烧过程中产生大量的热量,并向周围扩散,使周围的空气和物质的温度升高,甚至引发新的燃烧,散发更多的热量。当燃烧失控后,随着高温焰气的流动、热量的传播,相继引发更多的附近物质普遍燃烧,即形成火灾。

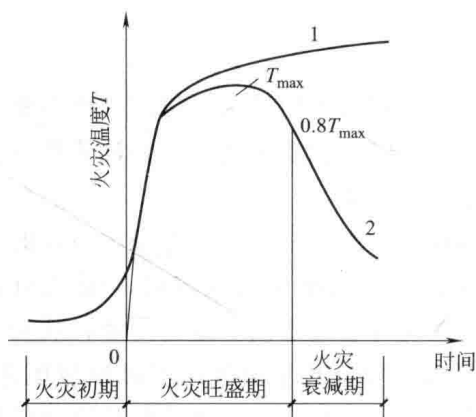


图 1-1 火灾发展过程
1—ISO-834; 2—实际曲线

室内火灾的发展过程有一定的特点和规律性,一般经过三个阶段,即火灾初期、火灾旺盛期(轰燃)和火灾衰减期(熄灭)。室内平均温度(即火灾温度 T)是表征火灾燃烧强度的重要指标,因此,常以温度随时间变化的情况来描述室内火灾的发展过程,如图 1-1 中曲线 2 所示。图 1-1 中曲线 1 所示的是国际标准升温曲线。标准升温曲线忽略了火灾的初起阶段(火灾初期)和衰减熄灭(火灾衰减期)阶段,主要模拟了火灾的发展阶段(火灾旺盛期)。

① 火灾初期 或称火灾初始增长期,只有少量可燃物在燃烧,着火区的平均温度低,而且燃烧速度较慢,对建筑结构的破坏力也较低。这是火灾的第一阶段。

② 火灾旺盛期 随着燃烧时间的延长,火灾规模扩大,并导致火灾区全面燃烧,即轰燃,标志着火灾进入第二阶段——旺盛期。这时可燃物充分燃烧,火灾区域内的平均温度急剧上升;轰燃后空气从破损的门窗进入起火区,使火灾区域内所有的可燃物全部进入燃烧,并且火焰充满整个空间,火灾温度随时间的延长而持续上升,在可燃物即将烧尽时达到最高温度($T_{\max}$),一般可达 1100°C 左右,破坏力很强,可以严重地损害室内设备,使建筑结构持续快速升温,并达到最高温度。与之相应,结构和构件的承载力和变形性能迅速劣化,发生不同程度的损伤,甚至造成建筑物部分或全部倒塌,对建筑结构产生严重威胁。这是火灾中最危险的阶段。

③ 火灾衰减期 经过火灾旺盛期后,火灾区内可燃物大都被烧尽,火灾温度逐渐降低,直至熄灭。一般把火灾温度降低到最高值的 80% ($0.8T_{\max}$) 作为火灾旺盛期与衰减期的分界,这一阶段虽然有焰燃烧停止,但火焰的余热还能维持一段时间的高温,衰减期温度下降速度比较慢。

进入火灾第三阶段初期,随着空气温度的逐渐下降,结构表层的温度不再增高,但温度的绝对值仍高,且经过了较长时间的持续高温,结构性能仍可能继续劣化,使损伤加重。当火灾熄灭、室内恢复常温后,结构混凝土在高温时的损伤不能恢复,强度继续有所下降,即混凝土高温后强度比高温时低。钢筋的屈服强度虽然可恢复,但高温时的变形不能恢复。故火灾后,结构有较大的残余变形、裂缝和局部爆裂等严重损伤现象,结构的剩余承载力也将有不同程度的降低。

1.1.2 影响火灾温度的因素

室内火灾各不相同,主要受室内可燃物的种类、性质和数量,壁面和通风口的大小和位置以及建筑材料的热工性能等因素的影响。它们之间存在着复杂的相互作用,从而形成不同损伤状况的各种室内火灾。

火灾旺盛期的持续时间和火灾温度主要与室内可燃物种类、性质和数量有关。可燃物数量越多,燃烧时间则越长;单位发热量高的可燃物越多,室内温度则越高。此外,火灾旺盛期的持续时间和火灾温度也与室内通风条件有很大的关系。门窗开口面积越大,通风条件越好,氧气供给越充足,火灾温度越高,燃烧时间则越短。反之,燃烧时间长而温度低。

① 室内可燃物种类、性质和数量(热荷因子) 各种可燃物的品种和性质不同,必有不同的燃烧性能,即不同的起燃温度、燃烧速率和单位质量燃烧时发出的热量值。

可燃物的数量决定燃烧时的总发热量、火灾温度和火灾持续时间。

可燃物的分布状况,如集中、连续或分散分布,密实或疏松堆置,堆置的高度和面积等都影响燃烧速率、火灾的集中程度以及火灾的蔓延情况等。

火灾中,决定火灾持续时间长短的最主要因素是建筑物内可燃物的数量。建筑物内可燃物一般分为固定可燃物和容载可燃物两类。固定可燃物是指由可燃材料组成的建筑构件、装饰面层以及木制门窗和固定家具等,其数量可通过设计图纸直接获得。容载可燃物是指室内存放的可燃物,其数量和种类变化很大,难以准确估计,一般由调查统计确定。

每平方米地板面积上平均可燃物的总热值称为火灾荷载(单位为 MJ/m^2)。因此火灾荷载的确定主要是确定容载可燃物。

② 室内通风条件(通风因子) 房间的面积和形状、门窗洞口的面积和位置影响室内的通风情况,从而影响燃烧速率和室内温度的升高程度。

当通风口很小时,外界空气流入困难,燃烧不强烈,燃烧速率也很低;通风口较大时,空气供应充分,燃烧强度较大,这样室内既有较高的温度,又有较好的通风,燃烧速率便较大,在两者配合最合适的情况下,燃烧速率达到最大值。之后通风口再增大,就会造成热烟气层减薄、经过通风口向外的辐射散热增加,使室内平均温度降低,并使燃烧速率降低。