

RESEARCH ON FIRE RESISTANCE OF
TWO-WAY REINFORCED CONCRETE SLABS

钢筋混凝土 双向板抗火性能研究

杨志年 徐国强 韩建强 尤志国 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

钢筋混凝土双向板抗火性能研究

杨志年 徐国强 韩建强 尤志国 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土双向板抗火性能研究/杨志年等著. —武汉:武汉大学出版社,
2015.7

ISBN 978-7-307-16338-6

I. 钢… II. 杨… III. 钢筋混凝土—双向板—防火—研究 IV. TU375.24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 157198 号

责任编辑:蔡 巍

责任校对:路亚妮

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:虎彩印艺股份有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:13.75 字数:323 千字

版次:2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-16338-6 定价:72.00 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。

前 言

火灾造成的经济损失仅次于旱灾和水灾,而发生的频率则位居各种灾害之首。火灾中钢筋混凝土结构或构件会遭受严重损伤甚至倒塌,因此,人们越来越重视钢筋混凝土结构或构件在火灾(高温)情况下的力学性能,并对此展开了大量试验研究和理论分析。近年来,我国高层建筑发展迅速,建筑结构火灾安全问题也日益突出。随着科学技术和国民经济的发展,建筑结构的抗火性能研究以及火灾下对其进行性能化设计已经成为工程的研究热点。火灾中,作为结构主要受力构件的钢筋混凝土双向板受力复杂,且影响因素多,目前相关的试验及理论研究尚不完善。本书由华北理工大学建筑工程学院杨志年博士撰写,书中实验数据和研究成果是由著者于2008—2012年在哈尔滨工业大学攻读博士研究生期间完成的。在此,感谢博士生导师董毓利教授对著者研究工作的指导。本书的撰写得到了华北理工大学建筑工程学院徐国强、韩建强和尤志国的大力支持和参与,在此表示感谢。

我们的研究工作得到了国家自然科学基金(51178143、51478161)、河北省自然科学基金(E2014209099)等项目的支持,同时得到了相关领域多位专家的教诲和指导,本书还引用了国内外专家、学者的研究成果,在此一并表示感谢。

本书共分6章。第1章主要介绍了研究的背景和国内外的研究现状。第2章介绍了足尺钢筋混凝土双向板火灾试验的研究成果及结论。第3章介绍了火灾下钢筋混凝土双向板的极限承载力计算方法。第4章对整体结构中钢筋混凝土双向板进行了火灾试验研究,提出了一些实用性较强的结论。第5章介绍了火灾下钢筋混凝土双向板的声发射特性。第6章介绍了火灾下钢筋混凝土双向板的振动特性。

本书内容体系完整,具有较强的创新性和较高的学术价值,可供结构工程及相关专业科研人员参阅。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

著 者

2015年5月

于华北理工大学建筑工程学院
河北省地震工程研究中心

目 录

1 绪论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 相关领域研究现状	(4)
1.3 本书研究内容	(13)
2 足尺钢筋混凝土双向板火灾试验研究	(14)
2.1 引言	(14)
2.2 火灾试验炉简介	(14)
2.3 四边简支双向板火灾试验研究	(17)
2.4 四边固支双向板火灾试验研究	(27)
2.5 邻边简支邻边固支钢筋混凝土双向板抗火性能试验研究	(37)
2.6 本章小结	(50)
3 火灾下钢筋混凝土双向板极限承载力计算	(51)
3.1 引言	(51)
3.2 高温下的材料性能	(51)
3.3 板受拉薄膜效应简介	(66)
3.4 传统塑性铰线理论简介	(67)
3.5 四边简支钢筋混凝土双向板的极限承载力计算	(69)
3.6 四边固支钢筋混凝土双向板的极限承载力计算	(80)
3.7 邻边简支邻边固支钢筋混凝土双向板的极限承载力计算	(87)
3.8 本章小结	(99)
4 整体结构中钢筋混凝土双向板火灾试验研究	(100)
4.1 引言	(100)
4.2 钢框架试验楼设计	(100)
4.3 试验楼顶层加载	(103)
4.4 整体结构中角区格板火灾试验研究	(104)
4.5 整体结构中中区格板火灾试验研究	(116)
4.6 本章小结	(126)
5 火灾下钢筋混凝土双向板声发射特性研究	(127)
5.1 引言	(127)

5.2	声发射基础知识	(127)
5.3	火灾下整体结构中角区格板声发射特性研究	(131)
5.4	火灾下整体结构中中区格板声发射特性研究	(139)
5.5	火灾下钢筋混凝土简支双向板声发射特性研究	(142)
5.6	火灾下钢筋混凝土固支双向板声发射特性研究	(152)
5.7	火灾下邻边简支邻边固支钢筋混凝土双向板的声发射特性研究	(160)
5.8	本章小结	(167)
6	火灾下钢筋混凝土双向板振动特性分析	(169)
6.1	引言	(169)
6.2	振动测试简介	(170)
6.3	火灾下整体结构中角区格板振动特性分析	(176)
6.4	火灾下整体结构中中区格板振动特性分析	(179)
6.5	火灾下钢筋混凝土简支双向板振动特性分析	(181)
6.6	火灾下钢筋混凝土固支双向板振动特性分析	(191)
6.7	火灾下钢筋混凝土邻边简支邻边固支双向板振动特性分析	(196)
6.8	本章小结	(200)
	参考文献	(202)

1 绪 论

1.1 研究背景

火在人类漫长的进化过程中起着巨大的推动作用。火的使用不仅改善了人类的生活条件,还不断促进了社会生产力的发展,人类利用火创造出了大量的社会财富。从某种意义上说,火对于人类文明的进步作出了重大的贡献。然而,火灾也成为人类需要面对的主要灾难,火灾每年无情地夺走成千上万人的生命,造成数以亿计的经济损失。根据联合国提供的统计资料,近几年全球范围内的火灾多达 600 万~700 万起,每年约有 7 万人葬身火海。

火灾有建筑物火灾、森林火灾、交通工具火灾、工矿火灾等。其中,发生次数最多,损失最严重的当数建筑物火灾。因为建筑物是人员密集、财物集中的地方。我国现在一直处于火灾的严重时期,火灾的次数和造成的财产损失、人员伤亡居高不下。新疆克拉玛依友谊馆火灾、洛阳东都商厦火灾等都造成了巨大的人员伤亡,令人触目惊心。

建筑火灾日益频发,是各种灾害中发生频率最高的,其所造成的经济损失也是除旱灾和水灾外最大的^[1]。统计资料表明,我国每年火灾造成的经济损失为:20 世纪 50 年代平均 15 亿元,60 年代 115 亿元,70 年代 215 亿元,80 年代 312 亿元,90 年代以后,火灾造成的直接财产损失上升到年均十几亿元,年均死亡 2000 多人^[2]。我国 1999—2008 年 10 年间火灾起数、损失和死亡人数见表 1-1。近年来,著名的火灾如 2001 年美国纽约的世贸大厦“9·11 事件”大火、2006 年我国无锡市的 24 层财富大厦火灾和 2009 年央视新大楼的北配楼火灾,都造成了巨大的人员伤亡和财产损失,如图 1-1 所示。这些惨痛的教训,极大地促进了建筑结构抗火领域的快速发展,也使建筑工程领域的科研和设计人员在保证建筑结构具有良好的抗火性能方面责任重大^[2,3]。

表 1-1

1999—2008 年中国火灾统计

年份	起数/万起	直接损失/亿	死/千人	伤/千人
1999 年	18	14.3	2.744	4.572
2000 年	12.2	11.9	3.021	4.404
2001 年	12.4	9.4	2.314	3.752
2002 年	25.8	15.4	2.393	3.414

续表

年份	起数/万起	直接损失/亿	死/千人	伤/千人
2003 年	25.5	15.9	2.497	3.098
2004 年	25.3	16.7	2.558	2.969
2005 年	23.5	13.6	2.496	2.506
2006 年	22.3	7.84	1.517	1.418
2007 年	15.9	9.9	1.418	0.863
2008 年	13.3	15	1.385	0.684



(a)



(b)

图 1-1 建筑火灾

(a) 世贸大厦火灾; (b) 无锡财富大厦火灾

钢筋混凝土结构在使用过程中受到温度的作用可分为两类:一类结构经常处于高温状态工作,例如:冶金和化工企业的高温车间,其结构表面经常处于高温辐射下,温度可达 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$;烟囱排放高温烟气,内衬达 $500\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$,外壳达 $100\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。另一类则在事故火灾状况下遭受高温冲击(可达 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或更高),例如:建筑结构在事故火灾情况下,很短时间内,最高温度可达 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

高温下混凝土(结构)构件的安全度和使用性能受到损害,主要有两个方面的问题:

① 混凝土本身的材料性能在高温下发生变化或减弱,如体积膨胀、强度降低、表面爆裂等,从而引起构件的下垂、表面龟裂,甚至疏松、保护层脱落、钢筋外露等现象,使结构的承载能力下降。

② 结构温度变化形成的不均匀温度场,改变了结构的内力和变形状态,如超静定杆系结构的内力分布,二维、三维结构的温度应力等。这些附加应(内)力的数值很大,足以危及结构的安全。

前者属于材料性能问题,后者则为力学问题。事实上两者相互作用和影响,决定了结构高温性能的变化。

国外对钢筋混凝土结构的防火性能研究比较早,在 20 世纪 20 年代初已经注意到了钢筋混凝土结构的力学性能在温度作用下的变化,但大量研究还是从 20 世纪 50 年代开始的。特别是许多核反应堆预应力混凝土压力容器安全壳的建造,以及高层建筑的迅速发展,更增加了火灾的严重性和灭火的艰难,促使对钢筋混凝土的高温性能进行了更系统、深入的试验研究。许多国家都相继成立了许多防火研究组织,并建立了进行建筑结构防火性能研究的大型试验装置,如美国的 PCA 和 PIC、德国的 BIU 以及英国的 BRE 成立的防火研究部门等。目前,加拿大、美国、日本、英国等国家都取得了不少研究成果。

钢筋混凝土防火性能在国内的研究起步较晚。20 世纪 60 年代,冶金部、建筑科学研究院等单位进行过高温下混凝土强度的试验研究,并调研和分析了高温对厂房结构和烟囱等的影响,提出了相应的设计施工建议。公安部所属的消防研究所主要是对材料和建筑物的耐火等级进行研究,尚未涉及钢筋混凝土结构方面的性能研究。20 世纪 80 年代末,消防研究所建起了大型的构件耐火试验装置,也主要用于研究建筑产品及结构构件的耐火极限。一些学校也开始筹建专用设备,进行相关的试验和理论研究工作。

钢筋混凝土板是最重要的水平承重构件,不仅在多层建筑、高层建筑,甚至在超高层建筑中都被普遍应用;同时,其既适用于砌体结构,也适用于钢筋混凝土结构、钢结构和钢-混凝土组合结构,是应用最为广泛的构件之一。钢筋混凝土板作为建筑结构的水平结构体系,在保证建筑结构的承载力和结构的整体刚度方面具有重要作用^[4]。钢筋混凝土板有多种类型,按板的受力分类,可分为单向板和双向板;按板的形式分类,可分为实体平板、双向肋板以及组合楼板等。钢筋混凝土板的设计要考虑很多环境因素以及灾害的影响,如腐蚀、恶劣的温度条件以及火灾等,火灾对板的影响是钢筋混凝土板设计需重点考虑的因素之一。当室内火灾发生轰燃后,钢筋混凝土板除自身承受高温的作用外,还要防止火势蔓延到上一层楼。钢筋混凝土楼板作为水平承重构件要防止楼层在火灾时和火灾后发生倒塌。因此,楼板的防火性能对维持火灾下整体建筑结构的安全性至关重要。

目前,对于钢筋混凝土结构构件的防火设计,多数国家的相关规范中均采用“耐火等级”的设计概念,我国现行的防火设计规范如《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)等,对建筑物的耐火等级和建筑物的内部消防设施等基本上以指令的形式给出了具体的规定,但是对火灾作用下结构或构件的行为却缺乏关注,没有做出相应解释。这些基于试验的“处方式”设计方法只是简单、直观的表述,此类方法便于应用,但是多数方法缺乏合理、完善的解释,没能从根本上考虑高温作用下混凝土和钢筋材料性能的劣化,对于结构构件在火灾下的实际受力及约束条件等也不能准确地模拟,缺少理论基础,而且现行规范这些“处方式”的规定中,有些条文偏于保守造成实际的浪费,有些条文又失之于安全造成损失^[5-7]。因此,对各种工况钢筋混凝土板的防火性能进行试验研究与理论分析,可以为板的防火设计提供数据支持和理论指导,为板的防火设计由“处方式”向“性能化”发展提供基础。

近年来,建筑结构防火试验研究的对象多为单个构件,单个构件防火试验是研究建筑结构火灾下行为的基本方法和手段。作为研究结构火灾行为的“第一步”,单个构件防火试验为结构防火设计提供初步的数据支持和理论指导,是非常必要的,但是单个构件与实

际结构中构件的受力情况、边界条件并不相同,特别是整体结构中,其他部分对构件的约束作用可以改变构件的受力状态,并因为构件的受热膨胀引起刚度的变化等,对构件的火灾行为如变形、强度及极限承载力等产生不同的影响。因此,为了能够进一步深入地研究钢筋混凝土板的抗火性能,在真实整体结构中开展足尺钢筋混凝土板的抗火试验研究具有重要意义。

1.2 相关领域研究现状

1.2.1 钢筋混凝土板抗火性能研究现状

1.2.1.1 火灾下单个板的试验研究现状

(1) 国外研究现状

火灾试验属于灾害性试验,危险性高并且开展的难度也较大,国外开展对钢筋混凝土结构及构件的抗火性能研究比较早,从20世纪20年代初开始,就有学者注意到了高温作用下钢筋混凝土结构力学性能的变化。20世纪50年代,国外学者开始对钢筋混凝土结构的抗火性能进行大量研究。高层及超高层建筑越来越多使火灾严重性和灭火难度越来越大,这引起了对钢筋混凝土结构及构件抗火性能的更多关注,促进了对结构及构件在高温作用下的行为进行更系统和深入的研究。

美国的PCA(Portland Cement Association)于1960年通过抗火试验研究了水平约束力对钢筋混凝土板的抗火性能的影响^[8],试验结果表明,水平约束力能够提高预应力混凝土板和钢筋混凝土板的耐火性能。基于这些试验,美国预应力混凝土协会(PIC)推导出了一个简单的手算方法,用来评估水平约束力对板的耐火性能的影响。

1989年,Lin对使用有环氧树脂涂层的钢筋制作的钢筋混凝土双向板进行了抗火试验研究,该试验采用ASTM E 119标准曲线进行恒载升温试验。板的尺寸为 $5.5\text{ m} \times 4.3\text{ m}$,板厚 178 mm ,混凝土保护层厚度为 19 mm ,试验中对板在平面内进行了约束,以模拟 3×3 跨的楼板。试验结果表明,该类型板的抗火极限至少为 $4\text{ h } 10\text{ min}$ ^[9]。

2001年,Cooke对14块预应力混凝土单向板进行了抗火试验研究^[10],该试验是基于两种标准升温曲线进行的,即ISO 834国际标准和NPD(Norwegian Petroleum Directorate temperature-time curves)升温曲线。板的边界条件为简支,板边处没有水平约束,试验中考虑了板的厚度、混凝土类型、施加荷载类型和板底是否保护等因素对混凝土板火灾行为的影响,指出火灾下板的跨中平面外位移主要由弯曲应力控制。

2002年,Lim和Wade^[11]基于ISO 834标准升温曲线,利用BRANZ耐火试验炉进行了6块足尺寸板的抗火性能试验,其中,3块是混凝土平板,另3块是组合板。板的尺寸为 $3.3\text{ m} \times 4.3\text{ m}$,板厚分布于 $90 \sim 130\text{ mm}$,板边处没有水平约束,对板的四个角部进行了约束。不同试件中的配筋量不同,用于检验钢筋对裂缝控制的效果。试验采用ISO 834标准升温曲线升温 3 h ,试验结果表明,尽管板产生了较大的竖向位移(270 mm)和贯

通裂缝,但并没有出现坍塌现象,板最终呈双曲线的破坏模式,其耐火极限远高于屈服线理论的计算结果^[12]。

2004年,Foster和Burgess等^[13,14]对15块常温下没有水平约束的缩尺寸的钢筋混凝土板的大变形进行了试验研究和理论分析。在此基础上,对高温作用下缩尺寸的钢筋混凝土板的行为进行了研究,这些试验所施加的荷载远大于按塑性铰线理论计算的荷载,有的板在升温前施加的荷载达到了按塑性铰线理论计算值的2.8倍,施加如此大的荷载使板在升温之前便出现了薄膜效应,导致板出现了不合理的抗火行为,破坏时钢筋的温度过低。

2007年,Bailey^[15,16]进行了常温下和升温下总共48块水平方向没有约束的缩尺寸钢筋混凝土板的试验,对变化钢筋直径、间距(即配筋率)情况下钢筋混凝土板的破坏模式进行了研究,指出在常温下板的破坏形式包括钢筋拉断和角部混凝土压碎破坏两种,具体破坏形式与钢筋的配筋率有密切关系;高温下钢筋和混凝土性能的衰减使板在高温下的破坏主要为钢筋拉断破坏,板的配筋率增大时有可能发生角部混凝土压碎破坏。

2009年,Ellobody和Bailey^[17-19]对4块无黏结的后张拉预应力混凝土单向板和8块有黏结的后张拉预应力混凝土单向板进行了抗火试验研究,同时分别做了2块常温下的预应力混凝土板的试验并进行对比。研究表明,骨料类型对这两种预应力混凝土板的抗火性能有很大影响,砾石骨料板的竖向位移远大于石灰石骨料板的竖向位移;沿预应力筋方向的水平约束对两种板的抗火性能也有显著影响,有约束板的竖向位移小于无约束板的竖向位移;同时还指出现有欧洲规范对这两种板的耐火极限的规定偏于保守。

(2) 国内研究现状

国内对钢筋混凝土结构及构件抗火性能的研究起步较晚。冶金部、建筑科学研究院等单位在20世纪60年代对混凝土强度在高温作用下的变化进行过研究,通过调研和分析厂房及烟囱等结构在高温作用下的变化,提出了设计和施工的一些相关建议。消防研究所主要的研究也是针对高温下的材料性能和结构及构件的耐火等级等,对结构及构件的受火行为研究还没有涉及,尽管20世纪80年代末消防研究所也建立了部分适用于大型构件耐火试验的火灾试验炉,也仅限于对结构及构架耐火极限的研究。但受到2001年的“9·11”事件的影响,国内各大高校和科研院所纷纷建造结构抗火试验炉,进行建筑结构抗火方面的研究。

2003年,高立堂^[20-23]进行了4块简支无黏结预应力板和9块连续无黏结预应力板的抗火试验。试验中考察了钢筋混凝土保护层厚度和预应力度对抗火性能的影响,测试了板的挠度以及预应力的变化过程,获得了各个试件的耐火极限,并对试验过程中的宏观现象进行了描述。针对连续板,进行了边跨受火、中跨受火以及边中两跨同时受火等三种工况的火灾试验,考察了预应力度、负筋长度以及不同受火工况对最终破坏形式的影响。

2004年,陈礼刚^[24,25]进行了钢筋混凝土简支单向板和三跨连续单向板的恒载-升温条件下的火灾试验。试验中对火灾过程中的宏观现象进行了详细记录,并对板沿截面厚度上的温度场分布规律,挠度变形、连续板的内力重分布和破坏机构特点等进行了分析。通过不同工况下试件的受火试验,考察了混凝土强度等级、保护层厚度和配筋率对混凝土板抗火性能的影响,指出从板的火灾后变形恢复来讲,提高板的抗火性能最有效的方法是

增加板的配筋率,其次,增加保护层厚度也是提高板的抗火性能比较有效的方法。

2006年,韩金生^[26,27]对3块简支组合楼板与4块连续组合楼板进行了恒载-升温条件下的火灾试验。通过试验,研究了板的挠度、破坏机构以及内力重分布情况。研究结果表明,简支板的耐火性能较差,而连续板的负弯矩钢筋起到了显著作用,其耐火性能较好;升、降温阶段连续板都会出现内力重分布,并且不同受火工况对连续板内力重分布的影响非常大;塑性铰的出现时间、位置及次序对连续板的火灾行为有很大影响。

2007—2010年,郑文忠和侯晓萌等人^[28,29]开展了火灾下和火灾后无黏结预应力连续板的抗火性能试验。通过试验,研究了板的保护层厚度、荷载水平、配筋等关键因素对无黏结预应力混凝土板的抗火性能的影响。结合试验结果,提出了火灾下无黏结预应力板的预应力筋应力、跨中挠度和火灾后预应力筋的剩余应力、极限应力、裂缝宽度和变形的计算公式,提出了抗火设计方法以及相关的构造措施建议。

2010年,李国强和张娜思^[30]以薄膜效应为研究目的,开展了4块足尺压型钢板组合楼板的受火性能试验。试验中测量了组合楼板的温度场、混凝土应变和挠度等,研究了板的最终破坏形态,并通过试验结果,证实了火灾作用下楼板存在受拉薄膜效应及其对提高极限承载力的有利作用,分析了受拉薄膜效应的发展过程。

1.2.1.2 火灾下整体结构中板的试验研究现状

由于在整体结构中开展足尺板的火灾试验花费较为昂贵,开展的难度也较大,所以目前世界范围内,有关整体结构下板的火灾试验研究开展很少,其中最著名的是1995—1996年英国房屋建筑研究所(BRE)和英国钢结构协会等研究机构联合进行的Cardington火灾试验^[31—33]。

Cardington火灾试验对象为一栋3×5跨8层钢框架足尺楼房,考虑房间尺寸和位置的不同,在该试验楼中进行了一系列的足尺寸火灾试验。在这些试验中,压型钢板组合楼板的底部和钢梁均没有被保护,而对钢柱进行了自下而上直到楼板底部的全面保护。这些试验的最高火灾温度超过了1100℃,组合楼板承受了很大的竖向位移(大于跨度的1/20),但结构并没有出现坍塌。试验结果表明,火灾作用下,虽然没有保护的钢梁温度超过1100℃,但由于压型钢板组合楼板与钢梁共同工作、相互作用,钢梁所承担的荷载逐步的转移到了混凝土楼板上,使构件表现出了较强的抗火性能。

Cardington火灾试验之后,为研究火灾下楼板的薄膜效应^[34],BRE又进行了一次足尺的组合楼板火灾试验^[35,36],组合楼板的尺寸为9.5 m×6.5 m,压型钢板的肋槽深60 mm,板的总厚度为150 mm。待混凝土浇筑成型一段时间之后,将组合楼板下面的压型钢板抽掉,剩下只配有钢筋网的混凝土楼板,抽掉的压型钢板相当于火灾时板的强度和刚度损失。板竖向支承于梁和柱上,水平方向没有约束。通过试验指出四边简支板的承载力远高于按传统的屈服线理论计算的承载力。

1.2.1.3 火灾下板的极限承载力研究现状

早在20世纪60年代,人们就已经对钢筋混凝土板的薄膜效应进行了大量的试验和理论研究^[37—47],并从那时发现了受拉薄膜效应对提高板的极限承载力的有利作用。但是,当时的研究主要是以板的小挠度下的受压薄膜效应为主,并且大多都是对常温下板的

薄膜效应的研究,而对大挠度和火灾条件下板的受拉薄膜效应不太适用。20世纪90年代以后,Cardington火灾试验证明火灾下整体结构中的钢筋混凝土组合楼板具有非常显著的薄膜效应,楼板在防止结构的倒塌中起到了重要的作用^[48,49],这引起了国内外学者们对火灾下钢筋混凝土板的行为的极大关注,开始对板在火灾条件下极限承载力进行大量的研究。

(1) 国外研究现状

1967年,Kemp^[38]提出了基于刚塑性假设的考虑薄膜效应的无水平约束简支方板承载力计算模型。各塑性铰线截面处的中性轴位置是根据几何关系和面内的平衡得出的。在确定中性轴位置以后,由屈服线理论计算极限弯矩和薄膜力,结合板块平衡法求得极限荷载。该方法虽然是基于均布荷载推导得出,但利用同样的方法可以求得其他具有类似对称荷载分布形式的方板承载力。若在板的设计中充分考虑薄膜效应的有利作用,可以节省10%~20%的钢筋用量。

1968年,Janas^[39]分析了包含薄膜效应和大位移下的几何改变影响的混凝土板的塑性计算方法。基于刚塑性体的流动准则,推导了板的荷载-挠度曲线,从起初产生的压力反拱效应直至大挠度下产生薄膜拉力和开裂现象。该方法是利用运动学的速率描述形式,基于能量法和平衡法,并假定在大挠度状态下的破坏模式与初始的破坏模式一致推导了固支单向板、混凝土方板和圆板的计算公式,从而分析了挠度对塑性行为的影响。

2004年,Usmani和Cameron^[50,51]根据Edinburgh大学进行的组合钢框架结构的计算模拟工作,发现由结构的热效应引起的热应变会对结构变形有影响,火灾下产生的受拉薄膜效应对结构整体性的有利作用比常温下更明显,这主要得益于火灾下楼板产生的热应变使板有较大挠度,一定程度上抵消了拉力应变,使火灾下的混凝土板有较大承载能力。根据以上分析,基于微分方程,结合艾里应力函数确定混凝土板在火灾下的准确挠度,提出了计算火灾下具有水平约束的混凝土矩形板承载力方法。

2009年,Cashell等^[52]主要研究了在极限状态下由钢筋断裂引起混凝土板破坏的发生机理,并提出了与钢筋断裂直接相关的破坏状态评估方法。通过对常温下独立约束构件的试验研究,确定了影响混凝土板破坏的关键参数,然后引入升温条件下钢筋延性的影响,提出了用于常温和高温下混凝土板极限状态时结构变形的分析方法。

2009年,Omer等人^[53]提出了预测有水平约束混凝土板在常温和升温条件下失效的计算模型。该模型以结构力学为基础,假定钢筋断裂作为唯一的破坏模式,克服了以往经验公式中的缺陷,并且能考虑钢筋和混凝土间的黏结强度、钢筋本构关系、薄膜效应和热膨胀对极限承载力的影响。通过理论推导,给出了极限承载力计算模型的精确和简化模型。研究表明,轻质混凝土板在火灾或者较大荷载作用下有显著的薄膜效应,影响钢筋断裂的主要因素是黏结强度和钢筋的硬化特性。

2010年,Omer等人^[54]提出了无水平约束的简支矩形板在火灾作用下的极限荷载的计算方法,其中考虑了几何尺寸和材料的温度效应、大挠度下产生的受拉薄膜效应以及钢筋和混凝土间的黏结力。该方法是基于试验观测得到的破坏图形,利用屈服线理论中的板块平衡法推导而出的。Omer等人^[55]将该方法的计算结果与试验结果和有限元分析结果进行对比,验证了其有效性。

足尺火灾试验可以给出钢筋混凝土板在火灾作用下各参数变化的精确数据,但是开展火灾试验危险性较大,并且花费较为昂贵,相比之下,建立有限元模型进行数值分析是较为省时、省力且经济的方法。所以很多学者选择了使用有限元方法对火灾下钢筋混凝土板的行为进行分析^[56-59]。

1997年,Huang和Platten^[60]建立了火灾下混凝土平面构件结构行为的非线性有限元模型。该模型中采用迭代和切线刚度方法进行求解,并且考虑了多种复杂因素对混凝土板火灾行为的影响,如热膨胀应变、收缩、徐变、开裂或压碎和材料性能随温度的变化特性等。爆裂的机理尚未研究清楚,因此模型中并未考虑高温下爆裂的影响。最后,将所提出模型的计算结果与已有的试验结果进行对比,分析了薄膜效应对提高混凝土板极限承载力的有利作用。1999年,Huang等人^[61]又利用Mindlin/Reissner厚板理论,将文献^[60]的有限元模型进行了修正、完善。

2001年,Huang^[62]考虑了材料和几何双重非线性,采用了VULCAN程序分析了混凝土楼板在火灾作用下的薄膜效应。由于周边板的约束程度对混凝土板的薄膜效应有较大影响,分析了1995—1996年间进行的多种约束工况的混凝土板火灾试验。通过有限元分析,对板的薄膜效应产生起关键作用的钢筋进行了初步研究,并对以后建筑结构的防火设计提供了相关建议。研究表明,当挠度较大时产生的受拉薄膜效应对混凝土板承担荷载有重要作用,混凝土板面是否出现大裂缝与板内钢筋强度和配筋率有关,受拉薄膜效应的产生与面内约束无必然联系,即使没有水平约束,在挠度较大时板内仍有明显的受拉薄膜效应产生,其薄膜力与板周边的受压环平衡。

2003年,Huang等人^[63,64]建立了混凝土板火灾行为的非线性分层的有限元计算模型。该模型以Mindlin/Reissner厚板理论为依据,基于整体拉格朗日方法,考虑了材料和几何的双重非线性计算混凝土板的火灾行为,并通过试验数据验证了该模型能有效地模拟火灾下混凝土板的受拉薄膜效应。采用该模型对Cardington实验室进行的大型钢框架结构中的混凝土板进行了有限元分析,展示了板内受拉薄膜效应的发生过程。

2003年,Lim^[65,66]通过有限元模拟和试验相结合的方法研究了火灾下混凝土板的受压薄膜效应和受拉薄膜效应。①主要通过非线性有限元软件SAFIR针对在标准国际升温曲线作用下的单跨混凝土单向板的火灾行为,研究了约束轴力在支座处不同作用高度和轴向约束刚度对受压薄膜效应的影响;②针对无水平约束的混凝土双向板和组合板,开展了6个混凝土板的火灾试验与建立的三维有限元分析模型的计算结果进行对比、研究了板的受拉薄膜效应。研究发现,混凝土单向板的火灾行为对边界条件和轴向约束刚度的影响较为敏感;试验和SAFIR的分析结果表明受拉薄膜效应能显著提高混凝土板的抗火性能。

2004年,Lim等^[67]利用计算机模拟了有轴向约束的简支单向混凝土板和有约束转角的混凝土单向板的火灾反应。利用非线性有限元分析程序SAFIR模拟承受均布荷载的单跨板,研究了边界处约束力位置和不同的轴向约束刚度对简支板抗火性能的影响,并且发现混凝土板的抗火性能对上述两种因素均较为敏感。然而,限制边界转动的混凝土板比同等条件的简支板具有良好的耐火能力,但其抗火性能对不同轴向约束刚度的敏感性不如简支板。

2004年, Gillie等^[68]利用有限元软件FEAST对同时承受弯曲和薄膜力的混凝土板在火灾下的强度进行了充分研究。考虑了混凝土板内温度场线性分布和非线性分布两种情况,分别计算了Cardington试验中典型的混凝土板在单独承担弯矩和薄膜力两种作用力下的火灾性能,同时进行了两者耦合作用下混凝土板的火灾行为分析,并将计算结果进行对比。研究发现,配筋面积以及布置方式对薄膜效应的发生有影响,从而影响到混凝土板的火灾行为。

2004年, Izzuddin等^[69,70]建立了常温和高温下同时考虑材料和几何非线性的壳单元计算模型,用于分析混凝土板或者组合板在真实火灾下的力学行为。新的壳单元主要是将传统的Reissner-Mindlin原理进行修正而来。利用该模型分析了在极端荷载作用下的混凝土楼板的大挠度性能,解释了受压拱效应(压力薄膜效应)和受拉薄膜效应在不同边界条件下对提高极限承载力的显著作用。

2004年, Izzuddin和Elghazouli^[71,72]提出了有轴向约束的轻质混凝土板在受火时的分析模型。该模型除了考虑升温影响外,对受压拱和受拉薄膜效应、几何尺寸、黏结滑移特性、钢筋的屈服和断裂等进行了详细分析,并将计算结果与非线性有限元分析结果进行了验证,重点研究了混凝土板极限状态与钢筋的断裂之间的关系;基于对主要参数的分析,提出了预测构件破坏的简化计算模型,为今后确定板的合理破坏模式以及进行安全设计提供了依据。

2005年, Anderheggen等^[73]提出了一种模拟钢梁与组合楼板间弯剪作用的分析方法。该方法是基于考虑薄膜效应的非线性分析程序SlabFem而建立的。随着温度的升高,钢梁的强度会逐渐降低并伴随产生较大的变形,从而改变荷载的承受机理。研究中分析了组合楼板的抗剪销钉对薄膜效应的影响。

2006年, Wang^[74]利用有限元软件SAFIR模拟了混凝土平板和单向板在升温下的结构反应,分析了多跨连续板中受火跨位置和周边约束的不同对火灾行为的影响,同时还研究了混凝土单向板在有降温段和不含降温段的国际标准升温曲线下的火灾行为。研究发现,混凝土平板的受火位置和板内钢筋的布置对弯矩和薄膜力的分布有显著影响;板的受拉薄膜效应能显著提高抗火性能。

2007年, Zhang和Bradford^[75]提出了能进行承受外荷载和热力荷载的混凝土薄板、中等厚度板和厚板有限元分析的层状平板单元,该单元模型是将Timoshenko组合梁函数拓展应用到层状平板单元中。模型中考虑了温度对材料非线性的影响,以及几何非线性对抗拉薄膜效应的影响。基于提出的单元模型,采用更新拉格朗日方法推导非线性分析单元及求解方法。

2008年, Yu和Huang^[76]认为在以往的数值模拟中,弥散型裂缝模型虽然能很好地模拟构件的整体行为,但不能模拟裂缝的真实开裂及发展等情况;若采用分离式裂缝模型,能较好地模拟裂缝的开裂开展情况,但计算过程对网格划分的依赖性强且计算耗时。因此选用了不依赖网格划分的EFEM单元(嵌入式单元)模拟裂缝的开裂及开展情况。外荷载将会引起板的伸长和弯曲的耦合,导致某些关键位置处裂缝开展并进一步发展,最终形成贯通裂缝。单纯的伸长或单独的裂缝贯通都不能正确地模拟裂缝的开裂行为。因此采用非线性分层且带有嵌入的弱连接性单元模拟在大挠度情况下混凝土的抗拉破坏,

从而有效地分析混凝土板在大挠度下的力学行为。

2008年, Moss等^[77]利用SAFIR有限元软件模拟了多层多跨框架结构中混凝土双向板的火灾行为。选取的混凝土板位于框架结构中, 支撑在四个内柱上。为了充分模拟实际中火灾的不确定性带来的潜在危害, 分析中进行了两种受火工况的模拟, 包括ISO 834国际标准升温曲线(火灾持续时间为4 h)和考虑下降段的ISO 834国际标准升温曲线(升温1 h和降温段2~3 h), 并分析了火灾中结构中关键部位的内力重分布、薄膜拉力的发展规律以及两种不同受火工况下的对比, 尤其是火灾后降温段的力学行为。

2008年, Yu等^[78]利用分层9节点板单元和3节点梁单元组成的正交各向异性板的有限单元法, 进行了正交各向异性混凝土组合板的火灾行为模拟。组合板中, 上部平板部分由实体板单元模拟, 而底部的混凝土板肋部分用梁单元进行模拟。梁单元横截面的等效宽度是由固体板单元的尺寸和混凝土板肋的横截面尺寸决定的, 且梁与固体板单元具有共同的节点。Yu等提出了一种选择组合板截面的简单的评估方法, 能较好地分析组合板在火灾下的结构反应。

(2) 国内研究现状

2007年, 李国强等^[44, 45]将火灾下的楼板分为5个部分, 即周围的4个刚性板块和中部呈椭圆球面的板块。通过分别对板块的内力和弯矩进行分析并根据平衡方程及位移协调方程, 建立了火灾下考虑薄膜效应的极限承载力计算模型。通过已有试验验证了该方法是有效的, 并分析了温度、楼板的边长比、配筋分布和挠度等参数对楼板极限承载力的影响。基于该方法, 提出了对无防火保护的楼板进行抗火设计验算的实用计算方法。

2008年, 苏娟^[79]提出了分析火灾下钢筋混凝土板极限承载力的计算模型。该模型中考虑了受拉薄膜效应以及高温作用下混凝土和钢筋的强度衰减的影响。首先, 建立混凝土板的中性面内的力和弯矩的平衡方程, 再结合混凝土板的位移协调条件建立变形方程。其次, 通过板的挠度变形, 建立由艾里应力函数表示的微分控制方程。最后, 基于能量原理推导火灾下混凝土板的承载力计算公式。

2008年, 陈适才等^[80]基于退化壳原理, 将火灾下不均匀温度场引入建立的分层模型中, 并且在每层上考虑热弹塑性的本构关系, 建立了火灾下钢筋混凝土板壳结构的有限元计算模型。该模型中考虑了几何非线性的影响。计算表明, 该模型能较好地分析火灾下钢筋混凝土楼板的火灾反应。

2009年, 王振清等^[47]提出了考虑薄膜效应的钢筋混凝土板的极限承载力计算模型, 推导了位移、薄膜力和应力的计算表达式。与试验结果对比可知, 该方法能有效预测混凝土板的极限承载力, 并能计算出楼板各点的位移、薄膜力等。

2009年, 张娜思和李国强^[46]基于已有的混凝土楼板薄膜效应计算的五参数模型, 提出了楼板薄膜效应计算的改进方法。该方法主要是对破坏模型和部分参数进行了新的假定和修正, 及对极限状态下的楼板实际的边界条件进行合理的简化和假设。通过与国内外试验结果对比可知, 改进后的计算方法是合理和有效的。

2010年, 王刚等^[81]基于板的压力膜受力机理和极限状态下的几何条件, 以侧向约束力为中间参数, 建立了跨中挠度与附加弯矩的对应关系, 提出了一种压力膜效应的极限承载力计算方法。另外, 试验研究了带约束混凝土单向板的极限承载力, 发现其实际承载力

比屈服线理论的计算值提高了 38%，并与计算结果比较发现，该方法精度较高，适用于工程应用。

1.2.2 火灾下钢筋混凝土板声发射特性研究现状

声发射(简称 AE)为当材料内部的局部能量积聚超过容许值时部分应变能以弹性波的形式快速释放的物理现象。声发射技术则是指基于声发射的特点利用声发射仪器探测并记录声发射信号,通过对声发射信号进行分析从而确定声源的技术。声发射技术的研究始于 20 世纪 40 年代初,奥伯特和霍德桑关于岩石失稳的预测研究报告,报告不仅阐述了声发射的基本思想,还研究了破裂点的定位技术。20 世纪 50 年代初,凯塞进一步研究了金属材料的声发射特性,发现了凯塞效应,极大促进了对岩石、玻璃、陶瓷等的疲劳裂纹扩展和增长速率的研究^[82]。作为混合材料,受载后混凝土结构或构件中引起声发射的原因比较多,如混凝土结构或构件的弹性和塑性变形,混凝土开裂、裂缝扩展以及摩擦等,还有混凝土内部的晶体错位和晶体滑移等都会引起混凝土的声发射。20 世纪 50 年代末,Rusch^[83]首次对受载混凝土材料的声发射进行了研究,指出在混凝土材料中也存在凯塞效应,但仅在混凝土强度低于其极限强度的 70%~85% 时存在。20 世纪 70 年代,Well^[84]发明了测定混凝土声发射信号的仪器。此后 Green 等^[85]对各种受力状态下混凝土声发射特性进行研究,证明了声发射特征参数是研究混凝土破坏的有效指标,是预测混凝土早期损伤程度的有效工具。

目前为止,对混凝土材料的声发射特性研究较多,相关研究方向有:对混凝土声发射基本特性的研究,混凝土中裂缝开展和扩展与声发射的关系,混凝土破坏时的声发射特征,利用声发射技术对混凝土的裂缝进行定位,混凝土凯塞效应的机理和应用等^[86-93]。

声发射无损检测技术现在已经非常成熟,其多用于建筑结构和桥梁等的损伤监测^[94,95]。声发射技术动态特性及灵敏度高特性使其现在越来越多地用于结构的损伤监测,尤其现在对梁的损伤监测研究比较多^[96-98],通过试验研究发现,受弯梁随荷载增加,声发射活性与裂缝发展之间有密切的相关性,凯塞效应只在极限荷载的 80% 以下时起作用,裂缝的产生、发展可以通过事件-位置图直观地表现出来^[99]。

升温作用下,由于混凝土的热惰性使混凝土内部形成不均匀温度场,从而产生温度应力,当温度应力大于混凝土的抗拉强度时,将导致混凝土开裂,产生声发射。温度作用下混凝土材料的声发射在升温、恒温 and 降温过程中有不同的特征,升温时声发射计数率逐渐增加,恒温时声发射计数率明显下降,降温时声发射计数率逐渐减少。混凝土在升温作用下的声发射少于常温下受载混凝土,而且高温作用下混凝土材料的声发射也存在凯塞效应,即混凝土的“热凯塞效应”^[100]。

Schneider 等^[98]对直径为 80 mm、高为 300 mm 的圆柱体混凝土试件进行了高温下的声发射特性试验研究,试验的加热速率为 2 K/min,持续加热到 900 ℃。试验中同时测量了混凝土的热应变、圆柱体试件的表面温度以及混凝土的声发射试件率,作为对比圆柱体试件采用硅质骨料和轻骨料两种不同的骨料,试验的声发射事件率表明,混凝土粗骨料的含量和粗骨料的类型是决定高温下混凝土声发射特性的关键因素。

目前对高温下混凝土声发射特性的研究并不多,资料很少且主要是对高温下混凝土