

建筑结构的耐火设计

中国建材工业出版社

路春森 屈立军 薛武平 邵涛 李红 编著



70354.5
L80

384377

建筑结构耐火设计

路春森 屈立军 薛武平 邵涛 李红 编著



中国建材工业出版社

(京)新登字 177 号

93/22

本书系统介绍了建筑构件的耐火试验方法,钢筋及混凝土在高温时和冷却后的力学性能,钢筋混凝土构件截面温度场计算等有关结构耐火设计方面的基本知识。在此基础上建立了与现行规范相适应的钢筋混凝土基本构件火灾时和火灾后的承载力计算理论和方法。据此,一方面可对按常温设计出的钢筋混凝土构件进行耐火稳定性验算以确保结构在火灾时安全可靠;另一方面可计算火灾后钢筋混凝土构件的剩余承载力,为结构修复补强提供依据。

此外,本书从钢结构基本受力性能出发,结合传热学和材料高温性能,导出了构件临界温度和保护层厚度的计算方法,首次建立了我国的钢结构耐火设计理论。

本书文字流畅,图文并茂,列有众多计算例题方便自学,并备有大量数表以求实用。

本书可作为结构设计工作者和防火工程技术人员的专业书籍,同时可作为结构工程专业的选修课及专题讲座教材。

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构耐火设计/屈立军等编著. -北京:中国建材工业出版社,1995.8

ISBN 7-80090-421-0

I. 建… II. 屈… III. 耐火-建筑结构-结构设计
IV. TU318

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 14560 号

建筑结构耐火设计

路春森 屈立军 薛武平 邵涛 李红 编著

中国建材工业出版社出版

(北京市百万庄 邮编:100831)

新华书店科技发行所发行 各地新华书店销售

北京天河照排中心排版

国防科工委印刷厂印刷

开本:850×1168 毫米 1/32 印张:7.75 字数:210 千字

1995 年 7 月第一版 1995 年 7 月第一次印刷

印数:2000 定价:15.00 元

ISBN7-80090-421-0/TU·95

前 言

抗震设计和耐火设计是建筑结构抗灾设计的主要内容。结构耐火设计的任务是保证建筑物在可能的火灾中不致倒塌失效。

钢结构耐火性极差早已为人们所接受,但我国钢结构耐火设计目前尚停留在用破坏性耐火试验来确定保护层厚度的较低水平上,急需建立安全可靠、实用方便的钢结构耐火设计方法。

钢筋混凝土结构是一种优良的耐火结构。但当火灾时有效荷载(实际作用的重力荷载)较大,室内可燃性物质较多,失火后又未能及时扑灭,钢筋混凝土结构也有可能发生倒塌。1993年南昌万寿宫商城火灾曾使一栋八层钢筋混凝土底框架结构整体倒塌这一严酷事实足应引起我国建筑结构工程界的关注。珠海某制衣车间大楼在火灾后第二天倒塌,造成二百余人伤亡。火灾后现场堪察表明,建筑结构于火灾中局部失效倒塌者更是枚不胜数。因此,世界上一些防火发达国家如法国、瑞典等国,对常温设计下的钢筋混凝土结构进行耐火稳定性验算,必要时进行补充设计,以确保结构在火灾中安全可靠。

此外,我国每年发生4~5万起火灾,大面积的钢筋混凝土结构过火,结构承载力降低。为修复补强,对过火的钢筋混凝土结构剩余承载力的计算将显得极为重要。

唐山大地震唤起了我国结构工程技术人员以极大的热情投入建筑结构抗震研究,并取得了辉煌的成就。愿万寿宫商城等建筑物在火灾中的倒塌、破坏能象抗震设计那样引起我们重视,有更多的大专院校、研究机构、设计单位,更多的工程技术人员来关心、支持、研究建筑结构耐火设计课题,提高我国结构抗灾设计水平。鉴于目前我国从事此课题研究的人员较少,尚无具有实用价值的书籍出版,笔者总结了数年来的研究结论和工程实践,吸

收国内外研究成果而编写本书。因作者水平有限，错误及不足在所难免，希望读者不吝赐教。

编 者

一九九五年六月

目 录

第一章 概述	(1)
第二章 建筑构件的耐火试验	(4)
§ 2-1 建筑构件的耐火性能	(4)
§ 2-2 建筑构件的耐火试验条件	(8)
§ 2-3 建筑构件的耐火试验装置	(13)
§ 2-4 建筑构件的耐火试验程序	(18)
第三章 钢筋混凝土构件截面温度场计算	(22)
§ 3-1 热传导微分方程	(22)
§ 3-2 温度场的差分解法	(30)
§ 3-3 温度场计算实用表格	(35)
§ 3-4 带有防火饰面层的构件温度场计算	(53)
第四章 钢筋和混凝土的高温力学性能	(58)
§ 4-1 普通混凝土的性能	(58)
§ 4-2 钢筋的性能	(61)
§ 4-3 钢筋和混凝土之间的粘结力	(64)
第五章 钢筋混凝土基本构件的高温承载力计算	(66)
§ 5-1 轴心受拉构件正截面承载力计算	(66)
§ 5-2 轴心受压构件正截面承载力计算	(67)
§ 5-3 单筋矩形梁正截面承载力计算	(88)
§ 5-4 双筋矩形梁正截面承载力计算	(100)
§ 5-5 实心板正截面承载力计算	(103)
§ 5-6 T形梁正截面承载力计算	(108)
§ 5-7 矩形偏心受压构件正截面承载力计算	(112)
§ 5-8 矩形偏心受拉构件正截面承载力计算	(121)
第六章 建筑结构耐火设计	(125)
§ 6-1 我国现行结构耐火设计方法评述	(125)

§ 6-2	室内火灾当量标准升温时间的确定	(134)
§ 6-3	钢筋混凝土结构耐火设计方法	(140)
第七章	钢结构耐火设计	(146)
§ 7-1	裸露钢结构的耐火性能	(146)
§ 7-2	临界温度的计算	(149)
§ 7-3	钢结构耐火保护方法	(158)
§ 7-4	钢结构耐火保护层厚度计算	(162)
第八章	建筑结构火灾后的鉴定与修复补强	(174)
§ 8-1	火灾后的现场检查	(174)
§ 8-2	结构受损程度评定	(178)
§ 8-3	当量升温时间的推定	(181)
§ 8-4	火灾后钢筋混凝土构件剩余承载力计算	(186)
§ 8-5	火灾损伤建筑结构的加固补强	(216)
参考文献		(236)

第一章 概 述

一、火灾对人类的危害

在人类进化和生产力发展过程中,火产生过巨大的推动作用。但是,火失控造成的火灾给人类的生命财产亦带来巨大危害。火灾每年要夺走成千上万人的生命和健康,造成数以亿计的经济损失。据统计,全世界每年的火灾经济损失可达整个社会生产总值的2‰。

1978年,美国共发生火灾307万起,损失金额约44亿美元。日本1980年发生火灾6万多起,损失金额约1460亿日元。我国的火灾次数和损失虽比发达国家少得多,但损失也相当严重。统计表明,我国火灾每年直接经济损失:五十年代平均为0.5亿元;六十年代平均为1.5亿元;七十年代为2.5亿元;八十年代为3.2亿元。进入九十年代,火灾损失更为严重。表1-1列出了这几年的火灾直接损失。

火灾损失

表 1-1

年 度	1990	1991	1992	1993	1994
损失(亿元)	5.4	5.2	6.9	11.2	12.4

根据国外统计,火灾间接损失是直接损失的3倍左右,那么,1994年全国已有近50亿财产被付之一炬。从表1-1看出,随着我国经济的发展,人口的增加,城市面积扩大,工业生产的复杂性及易燃易爆危险品的大量使用,火灾损失也与日俱增。1994年火灾直接损失是80年代的3.9倍,70年代的5.0倍;60年代的8.3倍;50年代的24.8倍。

常见的火灾有建筑火灾,露天生产装置火灾,可燃材料堆场火灾,森林火灾,交通工具火灾等。然而,发生次数最多,损失最严重

者当属建筑火灾。1993年,建筑火灾发生次数占总火灾的75%,直接经济损失占87%。

二、建筑防火技术措施

纵观目前世界各国的防火方法,其防火对策分为两类:一是预防失火,主要通过有关防火法规的贯彻执行;防火安全检查;防火宣传教育提高民众的防火意识等手段来达到目的。二是一旦失火,尽早发现,争取初期灭火,使其不致成灾,尽可能减小人民生命、财产损失。在建筑防火方面主要采取以下技术措施:

1. 在建筑物总平面布局时,留有适当防火距离,防止“火烧连营”;

2. 尽量选用非燃、难燃性建筑材料,减小火灾荷载;

3. 在建筑物平面和竖向合理划分防火分区,一旦某区失火,控制火势不致蔓延到其它分区,既可减小损失,又能便于扑救;

4. 合理设计疏散通道,失火时,确保灾区人员安全逃生;

5. 合理布置消防设施,如消火栓、消防车道、火灾报警、自动喷淋等设施,火灾后,尽早发现,进行初期有效扑救;

6. 合理设计承重结构及构件,使其在火灾中不致倒塌、失效,确保人员疏散及扑救安全。防止重大恶性倒塌事故的发生。

三、火对建筑结构的破坏作用

如果建筑结构由可燃材料制成,如木结构,则发生火灾时,结构本身产生燃烧,不断地削弱构件截面,势必造成结构倒塌。在现代建筑中大量采用的钢筋混凝土结构和钢结构,材料本身不燃,但由于火灾的高温作用,对结构将产生以下不利影响:

1. 钢材在高温下其强度和弹性模量降低,造成截面破坏或变形过大而失效、倒塌。表1-2为国内某些钢结构倒塌实例。

2. 钢筋混凝土结构中的钢筋虽有混凝土保护,但在高温作用下仍然强度降低,以致在初应力下屈服而引起截面破坏;混凝土强度和弹性模量随温度升高而降低;由于构件内温度梯度作用,可能造成构件开裂,弯曲变形;由于构件热膨胀,可能使相邻构件产生过大位移。

钢结构倒塌实例

表 1-2

建筑名称	结构类型	火灾日期	破坏情况	经济损失(万元)
重庆天原化工厂	钢屋架	1960.2.18	20min 倒塌	/
天津市体育馆	钢屋架	1973.5.5	19min 倒塌	160
长春卷烟厂	钢木屋架	1981.4.5	倒 塌	15.6
北京友谊宾馆剧场	钢木屋架	1983.12	20min 倒塌	200
唐山市棉纺织厂	钢屋架	1986.1	倒 塌	127
北京高压气瓶厂罐装车间	钢屋架	1986.4.8	倒 塌	/
江油电厂俱乐部	钢屋架	1987.4.21	20min 倒塌	19.3

例如,南昌万寿宫商城,八层底框架结构,5000多平方米。一、二层为小商品批发市场,层高4.0m,钢筋混凝土框架结构,纵向承重方案。三~八层为普通住宅,层高2.8m,砖混结构。于1993年5月第二层失火,大约于1.5h后使1#楼局部倒塌,稍后2#楼整体倒塌,造成近600万元的经济损失。

所以,建筑结构耐火设计的任务是通过常温下设计的结构构件进行必要的验算和补充设计,确保结构在限定的耐火时间内安全可靠。

即使在火灾中,建筑结构没有失效、倒塌,但肯定要受到损伤,承载力有不同程度降低。为了继续使用,需进行加固补强。所以,钢筋混凝土构件火灾后剩余承载力计算的研究具有重大经济意义。

第二章 建筑构件的耐火试验

§ 2-1 建筑构件的耐火性能

建筑构件耐火试验的目的是确定构件抵抗火烧的能力,即构件的耐火性能。一般而言,建筑构件的耐火性能包括两部分内容:一是组成构件材料的燃烧性能;一是构件的耐火极限。

一、构件材料的燃烧性能

目前,我国把建筑材料分为不燃性材料、难燃性材料、可燃性材料和易燃性材料四个级别。

1. 不燃性材料

不燃性材料是指受到火烧或高温作用时不起火、不微燃、不炭化的材料。用作结构材料的有钢材、混凝土、砖、石材等。

2. 难燃性材料

难燃性材料是指在空气中受到火烧或高温作用时难起火,当火源移走后,燃烧立即停止的材料。用于结构的难燃性材料有:经过阻燃、难燃处理后的木材以及某些塑料等。

3. 可燃性材料

可燃性材料是指在明火或高温下起火,在火源移走后大多能继续燃烧的材料。用于结构的可燃性材料主要有天然木材、竹子等。

4. 易燃性材料

凡达不到可燃等级的材料均为易燃性材料。易燃性材料不用作结构。

二、建筑构件的耐火极限

耐火极限是建筑构件耐火性能的主要指标。目前是通过标准

耐火试验来确定。

1. 耐火极限的定义

建筑构件的耐火极限是指构件在标准耐火试验中,从受到火的作用时起,到失去稳定性或完整性或绝热性时止,这段抵抗火作用的时间称为耐火极限,一般以小时计。

失去稳定性是指构件在试验过程中失去承载能力或抗变形能力。此条件主要针对承重构件。具体地讲:

墙——试验过程中发生坍塌,则表明试件失去承载能力。

梁或板——试验过程中发生坍塌,则表明试件失去承载能力。

试件的最大挠度超过 $\frac{L}{20}$,则表明试件失去抗变形能力。其中 L 为试件计算跨度。

柱——试验过程中发生坍塌,则表明试件失去承载能力。试件的轴向压缩变形速度超过 $3H(\text{mm/min})$,则表明试件失去抗变形能力。其中 H 为试件在试验炉内的受火高度,单位以 m 计。

失去完整性,是指分隔构件(如楼板、门窗、隔墙等)当其一面受火作用时,在试验过程中,构件出现穿透裂缝或穿火孔隙,火焰穿过构件,使其背火面可燃物燃烧起火。这时,构件将失去阻止火焰和高温气体空透或阻止其背火面出现火焰的性能。此时,即认为构件失去完整性。

失去绝热性是指分隔构件失去隔绝过量热传导的性能。在试验中,试件背火面测点测得的平均温度超过初始温度 140°C ,或背火面任一测点温度超过初始温度 180°C 时,均认为构件失去绝热性。

2. 耐火极限的判定条件

国家标准《建筑构件耐火试验方法》(GB9978-88)规定,耐火极限的判定分为分隔构件、承重构件以及具有承重和分隔双重作用的承重分隔构件。

分隔构件,如隔墙、吊顶、门窗等,当构件失去完整性或绝热性时,构件达到其耐火极限。也就是说,此类构件的耐火极限由完整

性和绝热性两个条件共同控制。

承重构件,如梁、柱、屋架等,此类构件不具备隔断火焰和过量热传导功能,所以由失去稳定性单一条件来控制承重构件是否达到其耐火极限。

承重分隔构件,如承重墙、楼板、屋面板等,此类构件具有承重兼分隔的功能,所以当构件在试验中失去稳定性或完整性或绝热性任何一条时,构件即达到其耐火极限。它的耐火极限由三个条件共同控制。

3. 建筑构件耐火极限的意义

对建筑构件进行耐火试验,研究建筑构件的耐火极限,是建筑防火工作的基本任务之一。作好建筑构件耐火试验研究工作,为正确地制定和贯彻执行建筑防火法规提供科学依据,为提高建筑结构的耐火性能和建筑物的耐火等级,降低防火投资,减小火灾损失提供技术措施,也和火灾后建筑物的修复补强工作直接相关。

我国标准《建筑设计防火规范》(GBJ16-87)将建筑物的耐火等级分为四级,其构件的燃烧性能和耐火极限不应低于表 2-1 规定。

国家标准《高层民用建筑设计防火规范》(GBJ45-82)根据建筑物的使用性质、火灾危险性、疏散与补救难度等将高层民用建筑的耐火等级分为两级,其构件的燃烧性能和耐火极限不应低于表 2-2 规定。

由表 2-1、表 2-2 可以看出,当建筑物的耐火等级确定后,要求建筑结构的耐火能力应达到相应规定标准,而结构的耐火能力主要由建筑构件的燃烧性能和耐火极限来保证。以楼板为例,用非燃材料制成如钢筋混凝土,其耐火极限如 $\geq 1.5\text{h}$,相应的建筑物可达到一级耐火等级;如耐火极限 $< 1.00\text{h}$ 但 $\geq 0.5\text{h}$,建筑物只能达到三级耐火等级。由此可见,建筑构件的耐火极限是结构耐火能力的主要衡量标准。

建筑物构件的燃烧性能和耐火极限

表 2-1

燃烧性能和耐火极限		耐火等级			
构件名称		一级	二级	三级	四级
墙	防火墙	非燃烧体 4.00	非燃烧体 4.00	非燃烧体 4.00	非燃烧体 4.00
	承重墙、楼梯间墙	非燃烧体 3.00	非燃烧体 2.50	非燃烧体 2.50	难燃烧体 0.50
	非承重外墙、疏散走道两侧的隔墙	非燃烧体 1.00	非燃烧体 1.00	非燃烧体 0.50	难燃烧体 0.25
	房间隔墙	非燃烧体 0.75	非燃烧体 0.50	非燃烧体 0.50	难燃烧体 0.25
柱	支承多层的柱	非燃烧体 3.00	非燃烧体 2.50	非燃烧体 2.50	难燃烧体 0.50
	支承单层的柱	非燃烧体 2.50	非燃烧体 2.00	非燃烧体 2.00	燃烧体
梁		非燃烧体 2.00	非燃烧体 1.50	非燃烧体 1.00	难燃烧体 0.50
楼 板		非燃烧体 1.50	非燃烧体 1.00	非燃烧体 0.50	难燃烧体 0.25
屋顶承重构件		非燃烧体 1.50	非燃烧体 0.50	燃烧体	燃烧体
疏散楼梯		非燃烧体 1.50	非燃烧体 1.00	非燃烧体 1.00	燃烧体
吊顶(包括吊顶搁栅)		非燃烧体 0.25	难燃烧体 0.25	难燃烧体 0.15	燃烧体

- 注:①以木柱承重且以非燃烧材料作为墙体的建筑物,其耐火等级应按四级确定。
 ②预制钢筋混凝土装配式结构的节点缝隙或金属承重构件节点的外露部位,应做防火保护层,其耐火极限不应低于本表相应构件的规定。
 ③二级耐火等级的建筑物吊顶,如采用非燃烧体时,其耐火极限不限。
 ④在二级耐火等级的建筑中,面积不超过 100 平方米的房间隔墙,如执行本表的规定有困难时,可采用耐火极限不低于 0.30 小时的非燃烧体。
 ⑤一、二级耐火等级民用建筑疏散走道两侧的隔墙,按本表规定执行有困难时,可采用 0.75 小时的非燃烧体。
 ⑥上人的二级耐火等级建筑的平屋顶,其屋面板的耐火极限不应低于 1.00 小时。
 ⑦建筑构件的燃烧性能和耐火极限,可参照 GBJ15-87 附录二。

建筑构件的燃烧性能和耐火极限

表 2-2

燃烧性能和耐火极限 (小时)		耐火等级	
构件名称		一级	二级
墙	防火墙	非燃烧体 4.00	非燃烧体 4.00
	承重墙、楼梯间、电梯井和住宅单元之间的墙	非燃烧体 3.00	非燃烧体 2.50
	非承重外墙、疏散走道两侧的隔墙	非燃烧体 1.00	非燃烧体 1.00
	房间隔墙	非燃烧体 0.75	非燃烧体 0.50
柱		非燃烧体 3.00	非燃烧体 2.50
梁		非燃烧体 2.00	非燃烧体 1.50
楼板、疏散楼梯、屋顶承重构件		非燃烧体 1.50	非燃烧体 1.00
吊顶(包括吊顶搁栅)		非燃烧体 0.25	难燃烧体 0.25

注:①预制钢筋混凝土构件的节点缝隙或金属承重构件节点的外露部位,必须加设防火保护层,其耐火极限不应低于本表相应构件的规定;

②在二级耐火等级的建筑中,面积不超过 100m² 的房间隔墙,如执行本表的规定有困难时,可采用耐火极限不低于 0.50 小时的难燃烧体或耐火极限不低于 0.30 小时的非燃烧体;

③与二级耐火等级高层主体建筑相连的附属建筑不上人的屋顶其承重构件可采用耐火极限不低于 0.50 小时的非燃烧体;

④各种建筑构件的燃烧性能和耐火极限可按 GB45-82 附录二确定。

§ 2-2 建筑构件的耐火试验条件

《建筑构件耐火试验方法》规定了标准耐火试验应遵守的升温条件、压力条件、加载条件、约束条件、受火条件和试件要求。只有按照这些标准试验条件进行试验,所得耐火极限才是可靠的,与其它构件具有可比性。

一、升温条件

耐火试验采用明火加热,使试件受到与实际火灾相似的火焰作用。

试验时,炉内温度的上升随时间而变化,按下式控制:

$$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1) \quad (2-1)$$

式中 t ——升温时间, min;

T —— t 时刻的炉温, $^{\circ}\text{C}$;

T_0 ——炉内初始温度, $^{\circ}\text{C}$, T_0 应在 $5\sim 40^{\circ}\text{C}$ 范围内。

式(2-1)表示的曲线称为时间——温度标准曲线, 如图 2-1 所示。

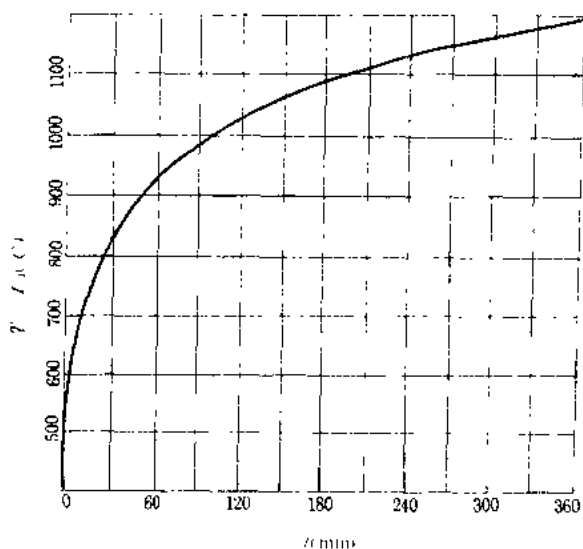


图 2-1 标准升温曲线

图 2-1 中表示时间、温度相互关系的代表值列于表 2-3。

标准升温曲线温度值

表 2-3

$t(\text{min})$	5	10	15	30	60	90	120	180	240
$T-T_0(^{\circ}\text{C})$	556	659	718	821	925	986	1029	1090	1133

目前, 世界上大多数国家都采用这条时间——温度标准曲线来升温, 这就在基本试验条件上趋于一致。

在试验中,由于操作及自动控制水平等多方面原因,要使炉温完全按时间——温度标准曲线升温是不可能的。因此,标准规定了允许误差。炉温偏离标准升温曲线的偏差值“ d ”用下式表示:

$$d = \frac{|A-B|}{B} \times 100 \quad (2-2)$$

式中 A ——实际平均炉温曲线下的面积;

B ——标准升温曲线下的面积。

当 $t \leq 10\text{min}$ 时, $d \leq 15\%$;

当 $10 < t \leq 30\text{min}$ 时, $d \leq 10\%$;

当 $t > 30\text{min}$ 时, $d \leq 5\%$ 。

面积计算方法是,试验开始 10min 内,时间间隔不超过 1min;在 10~30min 内,时间间隔不超过 2min;在 30min 以后,时间间隔不超过 5min。在此时间间隔限定下,把各时间间隔下的面积相加即可求出 A 、 B 。

除炉温按式(2-1)升温外,还尽可能保持炉内温度均匀一致。标准规定,在试验开始 10min 后的任何时刻,对于不燃结构,炉温单点最大偏离标准升温曲线不应大于 $\pm 100^\circ\text{C}$;对于可燃结构,最大偏差不大于 $\pm 200^\circ\text{C}$ 。

二、压力条件

试验开始 10min 后,炉内应达到以下规定的正压条件:

水平构件——在试件底面以下 100mm 处的水平面上应保持 $10 \pm 5\text{Pa}$ 压力;

垂直构件——在试件三分之二高度的以上范围内应保持正压,在炉内 3m 高度,距试件表面 100mm 处,应有 $20 \pm 5\text{Pa}$ 的压力。

规定正压的目的是为了在炉内与构件背火面之间形成一个压力差,便于观测试件的完整性是否被破坏。

目前,只有少数国家和国际标准强调压力条件。当然,我国亦在其列。

三、加载条件

承重构件的试验荷载,应在试验前一次加足,并在试验过程中