

陕西省工程建设标准

钢筋混凝土结构耐火设计标准

Standard for fire resistance design of reinforced concrete  
structures

(征求意见稿)

《钢筋混凝土结构耐火设计标准》编制组

2026年03月

## 前 言

根据陕西省住房和城乡建设厅、陕西省市场监督管理局《关于下达 2024 年度工程建设标准制定计划的通知》（陕建标发〔2024〕1007 号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内相关标准，结合陕西省实际，在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本规程的主要技术内容是：1. 总则；2. 术语和符号；3. 基本规定；4. 材料特性；5. 普通混凝土构件；6. 特殊混凝土构件；7. 既有钢筋混凝土结构耐火性能提升。

本标准由陕西省住房和城乡建设厅归口管理，陕西省建设标准设计站负责日常管理，西安建筑科技大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见和建议，请反馈至西安建筑科技大学（地址：陕西省西安市碑林区雁塔路 13 号，邮编：710055，电话：029-82202947，邮箱：wenbo\_mail@163.com）。

本标准主编单位：西安建筑科技大学

机械工业勘察设计研究院有限公司

本标准参编单位：陕西建工铁建工程有限公司

国网陕西省电力有限公司

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

国网陕西省电力有限公司经济技术研究院

国网江苏电力设计咨询有限公司

华南理工大学

哈尔滨工业大学

苏州城市学院

陕西省消防救援总队

中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司

陕西省建筑科学研究院有限公司

西安公路研究院有限公司

陕西迪康建设工程有限公司

本标准主要起草人员：文 波 张继文 张 华 冯南战

赵 栋 柏广林 张 路 高冠一

王怀正	张帆	王志浩	曹杰
田鹏刚	王东晶	谢景荣	李红星
张海燕	杨华	毛小勇	陈全杰
刘发起	于正耀。	崔恒宾	陈建
熊焱	吕瑶	马庆伟	杨法勇
纪翔	康永康	夏文	

本标准主要审查人员：

# 目 次

<b>1 总 则</b> .....	<b>1</b>
<b>2 术语和符号</b> .....	<b>2</b>
2.1 术 语 .....	2
2.2 符 号 .....	3
<b>3 基本规定</b> .....	<b>7</b>
3.1 耐火要求 .....	7
3.2 火灾升温曲线 .....	9
3.3 作用效应组合 .....	10
<b>4 材料特性</b> .....	<b>11</b>
4.1 普通钢筋 .....	11
4.2 普通混凝土 .....	12
4.3 煤矸石混凝土 .....	14
4.4 废玻璃混凝土 .....	18
<b>5 普通混凝土构件</b> .....	<b>24</b>
5.1 一般规定 .....	24
5.2 梁 .....	24
5.3 柱 .....	26
5.4 板 .....	32
5.5 墙 .....	33
<b>6 特殊混凝土构件</b> .....	<b>35</b>
6.1 一般规定 .....	35
6.2 震损混凝土构件 .....	35
6.3 煤矸石混凝土构件 .....	37
6.4 废玻璃混凝土构件 .....	38
<b>7 既有钢筋混凝土结构耐火性能提升</b> .....	<b>39</b>
7.1 一般规定 .....	39
7.2 防火涂料 .....	39
7.3 防火板材 .....	40
7.4 复合防护系统 .....	42

附录 A 高级计算方法 .....	44
附录 B 室内火灾的空气温度 .....	45
附录 C 简化计算方法 .....	48
本规程用词用语说明 .....	54
引用标准名录 .....	55

## Contents

1	General Provisions.....	1
2	Terms and Symbols.....	2
2.1	Terms.....	2
2.2	Symbols.....	3
3	Basic Provisions.....	7
3.1	Fire Resistance Requirements.....	7
3.2	Temperature-time Curve of Fire.....	9
3.3	Combination of Action Effects.....	10
4	Material Properties.....	11
4.1	Ordinary Steel Bars.....	11
4.2	Normal-strength Concrete.....	12
4.3	Solid Waste Concrete.....	14
4.4	Fire Insulation Materials.....	18
5	Normal-strength Concrete Members.....	24
5.1	General.....	24
5.2	Beams.....	24
5.3	Columns.....	26
5.4	Slabs.....	32
5.5	Walls.....	33
6	Special Concrete Members.....	35
6.1	General.....	35
6.2	Seismically Damaged Concrete Members.....	35
6.2	Coal Gangue Concrete Members.....	37
6.3	Waste Glass Concrete Members.....	38
7	Improvement of Fire Resistance of Existing Reinforced Concrete Structures.....	39
7.1	General.....	39
7.2	Fireproof Paint.....	39
7.2	Fireproof Board.....	40
7.3	Composite Protection System.....	42
	Annex A Advanced Calculation Methods.....	44
	Annex B Gas Temperature in Compartment Fire.....	45
	Annex C Simplified Calculation Methods.....	48

Explanation of Wording in This Standard.....	54
List of Quoted Standards.....	55

# 1 总 则

**1.0.1** 为减轻或避免建筑混凝土结构在火灾中的损伤，保护人身和财产安全，经济合理地进行建筑混凝土结构耐火设计，制定本标准。

【条文说明】本条阐明建筑混凝土结构耐火设计的目的。

**1.0.2** 本标准适用于陕西省境内采用普通混凝土或特殊混凝土的新建、改建、扩建建筑工程的耐火设计及性能提升。

【条文说明】本条阐明本规程的适用范围。

**1.0.3** 钢筋混凝土结构的耐火设计，除应符合本标准的规定外，尚应满足我国现行有关标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术语

**2.1.1 高温承载能力极限状态** limit state for load bearing capacity at high temperature

火灾下构件或结构达到极限承载能力或出现不适于继续承载的变形状态。

**2.1.2 标准火灾升温曲线** standard fire temperature-time curve

国际标准 ISO 834 给出的用于建筑构件标准耐火试验的炉内平均温度—时间曲线。

**2.1.3 等效曝火时间** equivalent fire exposure time

非标准火灾升温条件下,火灾在时间  $t$  内对构件或结构的作用效应与标准火灾升温条件下在时间  $t_e$  内对同一构件或结构的作用效应相同,则称  $t_e$  为相应的等效曝火时间。

**2.1.4 构件温度场** temperature distribution in structural member

火灾下任意时刻构件各点温度分布的总称。

**2.1.5 普通钢筋** ordinary steel bars

各类非预应力钢筋的总称。

**2.1.6 普通混凝土** normal-strength concrete

强度等级低于 C50 的混凝土。

**2.1.7 特殊混凝土** special concrete

震损混凝土、煤矸石混凝土和废玻璃混凝土的总称。

**2.1.8 震损混凝土** seismically damaged concrete

经地震后产生裂缝、混凝土剥落和残余变形等损伤的混凝土。

**2.1.9 煤矸石混凝土** coal gangue concrete

由煤矸石取代粗骨料制成的混凝土。

**2.1.10 废玻璃混凝土** waste glass concrete

由废玻璃取代细骨料或水泥制成的混凝土。

**【条文说明】**根据国家标准《工程结构设计基本术语标准》GB/T 50083,本规程对建筑混凝土结构耐火设计所涉及的一些重要术语作了专门规定。

## 2.2 符号

- $a$  —— 混凝土剥落厚度
- $\alpha_c$  —— 剩余承载力折减系数；
- $a_z$  —— 保护层剥落厚度；
- $A$  —— 全截面面积；
- $b$  —— 梁或柱的截面宽度、异形柱的截面肢厚；
- $B$  —— 室内火灾空气温度模型参数；
- $c$  —— 混凝土保护层厚度；
- $C$  —— 含温度的计算式；
- $C(c)$  —— 保护层厚度对剩余承载力折减系数的影响；
- $d$  —— 钢筋直径；
- $d/h$  —— 相对裂缝深度；
- $D_G$  —— 混凝土骨料损伤；
- $D_T$  —— 混凝土温度损伤；
- $D_l$  —— 混凝土荷载损伤；
- $e$  —— 偏心率；
- $e_0$  —— 组合轴向压力作用点至截面重心的距离；
- $e_{0y}$ 、 $e_{0z}$  —— 组合轴向压力作用点至经过截面重心的  $z$  轴、 $y$  轴的距离；
- $E_0$  —— 常温下普通混凝土弹性模量；
- $E_{r,T}$  —— 高温下煤矸石混凝土或废玻璃混凝土弹性模量；
- $E_{r,0}$  —— 室温下煤矸石混凝土或废玻璃混凝土初始模量；
- $E_c$  —— 偏心距；
- $f_{cT}$  —— 高温下普通混凝土的轴心抗压强度；
- $f_{cp}^T$  —— 高温下煤矸石混凝土或废玻璃混凝土的轴心抗压强度；
- $f_{cc}^T$  —— 高温下煤矸石混凝土的立方体抗压强度；
- $h$  —— 板的厚度、柱或梁的截面高度、异形柱的截面肢高；
- $\bar{h}/h$  —— 混凝土相对剥落长度；
- $k_{ec}$  —— 与煤矸石混凝土受火柱长细比及偏心距有关的常数；
- $L$  —— 柱的计算长度；

$M$  —— 常温下按简支梁或简支板计算的梁或板的跨中组合弯矩；  
 $M_u$  —— 常温下梁或板的跨中受弯承载力；  
 $n_c$  —— 轴压比；  
 $n_p$  —— 震损梁耐火极限折减系数；  
 $n_b$  —— 跨高比；  
 $N$  —— 荷载比；  
 $N_u$  —— 组合轴向压力作用点处的构件常温轴向承载力；  
 $r_c$  —— 煤矸石骨料取代率；  
 $r_{GP}$  —— 玻璃粉取代率；  
 $r_{GP}$  —— 玻璃砂取代率；  
 $r_a$  —— 回转半径；  
 $R_{dT}$  —— 高温下构件或结构的承载能力；  
 $R_T$  —— 耐火极限；  
 $[R_T]$  —— 规定的耐火极限；  
 $R$  —— 震损柱、柱构件耐火极限；  
 $R_0$  —— 完整构件耐火极限；  
 $R(b)$  —— 截面尺寸对剩余承载力折减系数的影响；  
 $R(r)$  —— 煤矸石取代率对剩余承载力折减系数的影响；  
 $S_{mT}$  —— 高温下构件或结构的作用效应组合；  
 $S_{Gk}$  —— 永久荷载（含预应力引起的次内力）标准值的效应；  
 $S_{Qk}$  —— 楼面或屋面活荷载标准值的效应；  
 $S_{Tk}$  —— 火灾下的标准温度作用效应；  
 $S_{Wk}$  —— 风荷载标准值的效应；  
 $S_R$  —— 柱的长细比；  
 $t$  —— 升温时间；  
 $t_e$  —— 等效曝火时间；  
 $t_m$  —— 煤矸石混凝土梁耐火极限；  
 $t_f$  —— 全盛期火灾持时；  
 $t_c$  —— 煤矸石混凝土柱耐火极限；  
 $T$  —— 材料温度；

- $T_g$  —— 火灾发生后的室内空气温度；  
 $T_{g0}$  —— 火灾发生前的室内空气温度；  
 $T_{gm}$  —— 火灾发生后室内空气最高温度；  
 $T(t)$  —— 受火时间对剩余承载力折减系数的影响；  
 $w/c$  —— 混凝土水灰比；  
 $\tau$  —— 全盛期火灾持时；  
 $\psi_f$  —— 楼面或屋面活荷载的频遇值系数；  
 $\psi_q$  —— 楼面或屋面活荷载的准永久值系数；  
 $\gamma_{0T}$  —— 结构耐火安全性系数；  
 $\varepsilon$  —— 应变；  
 $\varepsilon_{c,T}^{th}$ 、 $\varepsilon_{s,T}^{th}$  —— 高温下普通混凝土、普通钢筋的热膨胀应变；  
 $\varepsilon_0$ 、 $\varepsilon_{0T}$  —— 常温下、高温下普通混凝土的峰值应变；  
 $\eta_{yT}$  —— 高温下普通钢筋的屈服强度折减系数；  
 $\eta_{cT}$  —— 高温下普通混凝土或废玻璃混凝土的轴心抗压强度折减系数；  
 $\eta_{cc}$  —— 高温下废玻璃混凝土的立方体抗压强度折减系数；  
 $\eta_{tT}$  —— 高温下普通混凝土的抗拉强度折减系数；  
 $\chi$  —— 震损柱耐火极限折减系数；  
 $\chi_{cT}$  —— 高温下普通混凝土的初始弹性模量折减系数；  
 $\lambda_{cT}$  —— 高温下普通混凝土、煤矸石混凝土或废玻璃混凝土的导热系数；  
 $c_{cT}$  —— 高温下普通混凝土、煤矸石混凝土或废玻璃混凝土的比热容；  
 $\rho$  —— 全截面纵向受力钢筋配筋率；  
 $\rho_c$ 、 $\rho_{cT}$  —— 常温下、高温下普通混凝土或煤矸石混凝土的密度；  
 $\rho_t$  —— 纵向受拉钢筋配筋率；  
 $\beta$ 、 $\lambda$  —— 废玻璃混凝土损伤参数；  
 $\beta_z$  —— 震后层间位移角；  
 $\sigma$  —— 应力；  
 $\omega$  —— 混凝土中玻璃的质量占比；  
 $\mu$  —— 组合轴向压力与该力作用点处构件常温轴向承载力之比；  
 $A_c$ 、 $B_c$ 、 $D_c$  —— 煤矸石混凝土比热容相关参数；  
 $A_{cc}$ 、 $B_{cc}$  —— 煤矸石粗骨料取代率的参数；

$A_E$ 、 $B_E$ 、 $C_E$ 、  
 $M_E$ 、 $N_E$  —— 煤矸石混凝土弹性模量相关参数；

$a_c$ 、 $b_c$ 、 $c_c$ 、 $K$ 、  
 $L$ 、 $M$ 、 $N$  —— 煤矸石混凝土损伤参数；

$A_G$ 、 $B_G$  —— 玻璃砂取代率的参数；

$A_P$ 、 $B_P$  —— 与相对剥落长度有关的参数；

**【条文说明】**本规程采用的符号遵照国家标准《工程结构设计通用符号标准》GB/T 50132 的规定，并尽量与其它相关标准一致，以适应工程设计人员的习惯。

### 3 基本规定

#### 3.1 耐火要求

3.1.1 本标准以火灾下钢筋混凝土结构的承载能力极限状态为基础进行制定。

【条文说明】本规程以火灾高温下建筑混凝土结构的承载能力极限状态为基础进行耐火设计,其原理与常温下建筑混凝土结构的承载能力极限状态设计是一致的。

3.1.2 单、多层建筑和高层建筑的耐火等级及其承重构件的耐火极限应符合表 3.1.2 的规定。

表 3.1.2 不同耐火等级建筑相应的耐火极限 (h)

构件名称		耐火等级			
		一级	二级	三级	四级
墙	防火墙	不燃性 3.00	不燃性 3.00	不燃性 3.00	不燃性 3.00
	承重墙	不燃性 3.00	不燃性 2.50	不燃性 2.00	难燃性 0.50
	非承重外墙	不燃性 1.00	不燃性 1.00	不燃性 0.50	可燃性
	楼梯间和前室的墙 电梯井的墙 住宅建筑单元之间的墙和分户墙	不燃性 2.00	不燃性 2.00	不燃性 1.50	难燃性 0.50
	疏散走道两侧的隔墙	不燃性 1.00	不燃性 1.00	不燃性 0.50	难燃性 0.25
	房间隔墙	不燃性 0.75	不燃性 0.50	难燃性 0.50	不燃性 0.25
柱	不燃性 3.00	不燃性 2.50	不燃性 2.00	难燃性 0.50	
梁	不燃性 2.00	不燃性 1.50	不燃性 1.00	难燃性 0.50	
楼板	不燃性 1.50	不燃性 1.00	不燃性 0.50	可燃性	

注:表中未列入构件应根据《建筑设计防火规范》GB 50016 的要求确定。

【条文说明】本条的单、多层建筑是指适用于《建筑设计防火规范》GB 50016 的建筑,包括建筑高度不大于 27 m 的住宅建筑(包括设置商业服务网点

的住宅建筑），以及建筑高度大于 24 m 的单层公共建筑和建筑高度不大于 24 m 的其他公共建筑。

本条的高层建筑是指适用于《建筑设计防火规范》GB 50016 的建筑，包括建筑高度大于 27 m 的住宅建筑和建筑高度大于 24 m 的非单层厂房、仓库和其他民用建筑。

本标准不适用于炸药厂（库）、花炮厂（库）、无窗厂房、地下建筑、炼油厂和石油化工厂的生产区。

**3.1.3** 基于承载能力极限状态，承重构件或结构的耐火设计应满足下列要求之一：

1 在规定的耐火极限内，承重构件或结构的承载能力  $R_{dT}$  不小于按第 3.3.1 条确定的作用效应组合  $S_{mT}$ ，即：

$$R_{dT} \geq S_{mT} \quad (3.1.3-1)$$

2 在按第 3.3.1 条确定的作用效应组合下，承重构件或结构的耐火极限  $R_T$  不小于规定的耐火极限  $[R_T]$ ，即：

$$R_T \geq [R_T] \quad (3.1.3-2)$$

【条文说明】本条是承重构件或结构耐火验算的依据。作为建筑物的承重和支撑体系，承重构件或结构必须在火灾发生后的一定时间内保持足够的承载能力。火灾时随着温度的升高，材料强度降低，承重构件或结构的承载能力  $R_{dT}$  不断降低，当其降低至与按本规程第 3.3.1 条确定的作用效应组合  $S_{mT}$  正好相等时，即达到承载能力极限状态，此时承重构件或结构已无法继续承载。从受火开始至达到承载能力极限状态所需的时间即为承重构件或结构的耐火极限。式（3.1.3-1）和式（3.1.3-2）所列要求是等价的，满足其中一个即可。

**3.1.4** 对于高度大于 200 m 的高层建筑结构以及安全等级为一级的建筑结构，宜对结构整体进行火灾作用下的受力分析。火灾作用下结构的整体分析可采用附录 A 的方法。

【条文说明】考虑到火灾作用下结构的温度效应以及相邻构件之间的相互约束，结构的实际受力状况最好通过整体火灾分析获得。为更科学合理地进行结构耐火设计，对于高度大于 200 m 的高层建筑结构以及安全等级为一级的建筑结构，以结构整体火灾分析为基础的耐火设计是适宜的。建筑结构安全等级的划分依据《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153。

**3.1.5** 除第 3.1.4 条以外的一般单层和多高层建筑结构，可仅对构件进行耐火设计。

【条文说明】现行《建筑设计防火规范》GB 50016 只是针对不同构件给出了耐火极限要求。为实现与现行设计标准的衔接和过渡，同时考虑到结构整体火灾分析的计算工作量较大，对于一般单层和多高层建筑结构，可仅对构件进行耐火设计。

## 3.2 火灾升温曲线

3.2.1 一般室内火灾的空气温度采用如下标准火灾升温曲线计算：

$$T_g - T_{g0} = 345 \lg(8t + 1) \quad (3.2.1)$$

式中  $T_g$  —— 火灾发生后的室内空气温度 (°C)；  
 $t$  —— 升温时间 (min)。

$T_{g0}$  —— 火灾发生前的室内空气温度 (°C)；

【条文说明】影响室内火灾温度发展过程的因素很多，如可燃物的品种和数量、壁面材料的热工性能、通风条件等，这会导致不同室内火灾的空气温度-时间曲线相差较大。为使不同学者的研究成果具有可比性，以及对建筑结构提出统一的耐火要求，一些国家和国际组织制定了标准的室内火灾空气温度-时间曲线。本规程采用的标准火灾升温曲线为《建筑构件耐火试验方法(第1部分)》GB/T 9978.1所规定的升温曲线，也是国际标准化组织推荐的升温曲线。针对一般室内火灾，该升温曲线是偏于安全的。

3.2.2 当能准确确定室内有关参数时，可按附录 B 计算室内火灾的空气温度；当有可靠试验数据时，也可采用相应试验数据计算室内火灾的空气温度。

【条文说明】真实室内火灾的空气温度-时间曲线不一定与标准火灾升温曲线相同。当能准确确定室内可燃物的种类和数量、壁面材料的热工性能、通风条件等参数时，利用国内外已有的室内火灾空气温度-时间曲线模型，可获得更接近真实火灾的室内空气温度。附录 A 的计算模型参见文献“马忠诚，吴波，欧进萍. 全盛期隔间内火灾温度发展模型及其应用. 哈尔滨建筑大学学报，1998，31(1): 16-24”。

3.2.3 当采用第 3.2.2 条计算室内火灾的空气温度时，火灾对构件的影响可等效为标准火灾升温曲线在等效曝火时间  $t_e$  时段内对构件的影响，且有：

$$t_e = 4t^{0.68} \left( \frac{T_{gm} - T_{g0}}{1000} \right)^2 \quad (3.2.3)$$

式中  $t_e$  —— 等效曝火时间 (min)；

$T_{gm}$  —— 火灾发生后室内空气的最高温度 (°C)，按附录 B 的式 (B-2) 或式 (B-3) 确定；

$t_f$  —— 全盛期火灾持时 (min)，按附录 B 的式 (B-5) 或式 (B-6) 确定。

【条文说明】虽然标准火灾升温曲线与真实室内火灾的空气温度-时间曲线存在差别，但国内外有关结构耐火的大量研究成果都是在前者基础上获得的。为建立二者之间的联系，本条从能量等效角度出发，定义标准火灾升温曲线作用下

混凝土构件单位表面流入的热量达到真实火灾中单位表面流入的最大热量所需要的时间为等效曝火时间，并在数值分析结果基础上建立了式（3.2.3）。

### 3.3 作用效应组合

3.3.1 耐火设计时采用偶然设计状况的作用效应组合，应采用下面较不利的表达式：

$$S_{mT} = \gamma_{0T}(S_{Gk} + S_{Tk} + \psi_f S_{Qk}) \quad (3.3.1-1)$$

$$S_{mT} = \gamma_{0T}(S_{Gk} + S_{Tk} + \psi_q S_{Qk} + 0.4S_{wk}) \quad (3.3.1-2)$$

式中  $S_{mT}$  ——作用效应组合；

$S_{Gk}$  ——永久荷载（含预应力引起的次内力）标准值的效应；

$S_{Tk}$  ——火灾下结构或构件的标准温度作用效应，对于一般的单层和多高层建筑结构，可不考虑此效应；

$S_{Qk}$  ——楼面或屋面活荷载标准值的效应；

$S_{wk}$  ——风荷载标准值的效应；

$\psi_f$  ——楼面或屋面活荷载的频遇值系数，按《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定；

$\psi_q$  ——楼面或屋面活荷载的准永久值系数，按《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定；

$\gamma_{0T}$  ——结构耐火安全性系数，耐火等级为一级的建筑取 1.1，其它建筑取 1.0。

【条文说明】鉴于火灾发生是小概率事件，采用偶然设计状况的作用效应组合是适宜的。对于一般的单层和多高层建筑结构，可忽略温度内力的影响。因为温度内力是由于梁、柱等受火构件的轴向热膨胀，以及墙、板等受火构件的平面内热膨胀受到相邻构件的约束而产生的。在不进行结构整体火灾分析的情况下，受火构件的轴向热膨胀效应或平面内热膨胀效应可以忽略[见 Eurocode 2 Part 1-2（BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules — Structural fire design）第 2.4.2 条第（4）点]。

## 4 材料特性

### 4.1 普通钢筋

4.1.1 高温下普通钢筋的导热系数、比热容、密度和泊松比应采用《建筑混凝土结构耐火设计技术规程》DBJT 15-81-2022 中钢材的对应参数。

【条文说明】为应用方便，将普通钢筋和钢材的有关物理参数取为一致。

4.1.2 高温下普通钢筋的热膨胀应变按式（4.1.2）计算：

$$\varepsilon_{s,T}^{\text{th}} = \begin{cases} -2.416 \times 10^{-4} + 1.2 \times 10^{-5} T + 0.4 \times 10^{-8} T^2 & 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 750^{\circ}\text{C} \\ 11 \times 10^{-3} & 750^{\circ}\text{C} < T \leq 860^{\circ}\text{C} \\ -6.2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5} T & 860^{\circ}\text{C} < T \leq 1000^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (4.1.2)$$

式中  $T$  —— 材料温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）；

$\varepsilon_{s,T}^{\text{th}}$  —— 高温下普通钢筋的热膨胀应变。

【条文说明】取自 Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 第 3.4 条。

4.1.3 高温下普通钢筋的屈服强度折减系数按式（4.1.3）计算：

$$\eta_{yT} = \begin{cases} 1.0 & 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 100^{\circ}\text{C} \\ \frac{1.0}{1 + 10.4 \times (T/1000)^{2.84}} & 100^{\circ}\text{C} < T \leq 800^{\circ}\text{C} \\ 0.153 - 7.67 \times 10^{-4} (T - 800) & 800^{\circ}\text{C} < T \leq 1000^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (4.1.3)$$

式中  $\eta_{yT}$  —— 高温下普通钢筋的屈服强度折减系数。

【条文说明】国内外试验结果表明，随温度升高普通钢筋的屈服强度总体呈现出逐渐降低的趋势。文献“吴波，梁悦欢. 高温下混凝土和钢筋强度的统计分析. 自然灾害学报, 2010, 19(1): 136-142”通过对国内试验数据进行统计分析，获得了不同温度下普通钢筋屈服强度的折减系数均值，在此基础上建立了式(4.1.3)的主体部分，并为统一起见对  $20^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$  和  $800^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$  区间的屈服强度折减系数进行了补充。

4.1.4 高温下普通钢筋的弹性模量折减系数按式（4.1.4）计算：

$$\chi_{sT} = \begin{cases} 1.0 & 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 100^{\circ}\text{C} \\ \frac{1}{1 + 23.742 \times (T/1000)^{4.785}} & 100^{\circ}\text{C} < T \leq 800^{\circ}\text{C} \\ 0.109 - 5.457 \times 10^{-4} (T - 800) & 800^{\circ}\text{C} < T \leq 1000^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (4.1.4)$$

式中  $\chi_{sT}$  —— 高温下普通钢筋的弹性模量折减系数。

【条文说明】国内外试验结果表明，随温度升高普通钢筋的弹性模量总体呈

现出逐渐降低的趋势。文献“梁悦欢. 钢筋和混凝土高温力学性能的统计分析及应用. 广州：华南理工大学硕士学位论文，2008”通过对国内试验数据进行统计分析，获得了不同温度下普通钢筋弹性模量的折减系数均值，在此基础上建立了式（4.1.4）的主体部分，并为统一起见对 20℃~100℃和 800℃~1000℃区间的弹性模量折减系数进行了补充。

## 4.2 普通混凝土

4.2.1 高温下普通混凝土的导热系数、比热容和密度分别按式（4.2.1-1）~式（4.2.1-3）计算：

$$\lambda_{cT} = 1.68 - 0.19 \frac{T}{100} + 0.82 \times 10^{-2} \left( \frac{T}{100} \right)^2 \quad (20^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C}) \quad (4.2.1-1)$$

$$c_{cT} = \begin{cases} 900 & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \\ 900 + (T - 100) & 100^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C} \\ 1000 + (T - 200)/2 & 200^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C} \\ 1100 & 400^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.2.1-2)$$

$$\rho_{cT} = \begin{cases} \rho_c & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 115^\circ\text{C} \\ [1 - 0.02(T - 115)/85]\rho_c & 115^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C} \\ [0.98 - 0.03(T - 200)/200]\rho_c & 200^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C} \\ [0.95 - 0.07(T - 400)/800]\rho_c & 400^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.2.1-3)$$

式中  $\lambda_{cT}$  —— 高温下普通混凝土的导热系数 [W/(m·℃)]；

$c_{cT}$  —— 高温下普通混凝土的比热容 [J/(kg·℃)]；

$\rho_{cT}$  —— 高温下普通混凝土的密度 (kg/m<sup>3</sup>)；

$\rho_c$  —— 常温下普通混凝土的密度 (kg/m<sup>3</sup>)。

【条文说明】式（4.2.1-1）是在 Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 第 3.3.3 条给出的普通混凝土导热系数上、下限计算公式的基础上取平均得到的。式（4.2.1-2）和（4.2.1-3）取自 Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 第 3.3.2 条。虽然混凝土含水量在温度 100~200℃范围内对比热容有较大影响，但对结构的火灾行为影响有限，为应用方便式（4.2.1-2）未考虑含水量的影响。文献“路春森、屈立军、薛武平等. 建筑结构耐火设计. 北京：中国建材工业出版社，1995”建议高温下普通混凝土的比热容取常数值 920 J/(kg·℃)。随温度升高混凝土密度有所减小，这主要是水分高温蒸发所致。

4.2.2 高温下普通混凝土的热膨胀应变按式（4.2.2-1）、式（4.2.2-2）计算：

硅质骨料：

$$\varepsilon_{c,T}^{\text{th}} = \begin{cases} -1.8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} T + 2.3 \times 10^{-11} T^3 & 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 700^{\circ}\text{C} \\ 14 \times 10^{-3} & 700^{\circ}\text{C} < T \leq 1000^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (4.2.2-1)$$

钙质骨料:

$$\varepsilon_{c,T}^{\text{th}} = \begin{cases} -1.2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6} T + 1.4 \times 10^{-11} T^3 & 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \\ 12 \times 10^{-3} & 800^{\circ}\text{C} < T \leq 1000^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (4.2.2-2)$$

式中  $\varepsilon_{c,T}^{\text{th}}$  —— 高温下普通混凝土的热膨胀应变。

【条文说明】取自 Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 第 3.3.1 条。常见的硅质骨料如花岗石、石英砂、粉煤灰、矿渣等，钙质骨料如石灰石等。

4.2.3 高温下普通混凝土的轴心抗压强度折减系数按式 (4.2.3) 计算:

$$\eta_{cT} = \begin{cases} 1.00 & 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 300^{\circ}\text{C} \\ 1.61 - 2.38 \times 10^{-3} T + 7.34 \times 10^{-7} T^2 & 300^{\circ}\text{C} < T \leq 1000^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (4.2.3)$$

式中  $\eta_{cT}$  —— 高温下普通混凝土的轴心抗压强度折减系数。

【条文说明】国内外试验结果表明，随温度升高普通混凝土的轴心抗压强度总体呈现出逐渐降低的趋势。文献“吴波，梁悦欢. 高温下混凝土和钢筋强度的统计分析. 自然灾害学报, 2010, 19(1): 136-142”通过对国内试验数据进行统计分析，获得了不同温度下普通混凝土轴心抗压强度的折减系数均值，在此基础上建立了式 (4.2.3) 的主体部分，并为统一起见对  $20^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$  和  $700^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$  区间的轴心抗压强度折减系数进行了补充。

4.2.4 高温下普通混凝土的抗拉强度折减系数按式 (4.2.4) 计算:

$$\eta_{tT} = 1 - 0.001T \quad (20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1000^{\circ}\text{C}) \quad (4.2.4)$$

式中  $\eta_{tT}$  —— 高温下普通混凝土的抗拉强度折减系数。

【条文说明】普通混凝土的抗拉强度随温度升高单调下降。Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 第 3.2.2.2 条认为，不考虑混凝土的抗拉强度是偏于保守的。式 (4.2.4) 源自文献“李卫，过镇海. 高温下砼的强度和变形性能试验研究. 建筑结构学报, 1993, 14(1): 8-16”。

4.2.5 高温下普通混凝土的初始弹性模量折减系数按式 (4.2.5) 计算:

$$\chi_{cT} = \begin{cases} 1.0 - 1.725 \times 10^{-3} (T - 20) & 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 100^{\circ}\text{C} \\ 1.04 - 1.86 \times 10^{-3} T + 8.38 \times 10^{-7} T^2 & 100^{\circ}\text{C} < T \leq 700^{\circ}\text{C} \\ 0.149 - 4.967 \times 10^{-4} (T - 700) & 700^{\circ}\text{C} < T \leq 1000^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (4.2.5)$$

式中  $\chi_{cT}$  —— 高温下普通混凝土的初始弹性模量折减系数。

【条文说明】国内外试验结果表明，随温度升高普通混凝土的初始弹性模量

总体呈现出逐渐降低的趋势。文献“梁悦欢. 钢筋和混凝土高温力学性能的统计分析及应用. 广州：华南理工大学硕士学位论文，2008”通过对国内试验数据进行统计分析，获得了不同温度下普通混凝土初始弹性模量的折减系数均值，在此基础上建立了式（4.4.5）的主体部分，并为统一起见对 20℃~100℃和 700℃~1000℃区间的初始弹性模量折减系数进行了补充。

**4.2.6 高温下普通混凝土的应力—应变关系按式（4.2.6-1）、式（4.2.6-2）计算：**

$$\sigma = \begin{cases} f_{cT} \left[ 2.2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0T}} - 1.4 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0T}} \right)^2 + 0.2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0T}} \right)^3 \right] & 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{0T} \\ f_{cT} \frac{\varepsilon / \varepsilon_{0T}}{0.8(\varepsilon / \varepsilon_{0T} - 1)^2 + \varepsilon / \varepsilon_{0T}} & \varepsilon > \varepsilon_{0T} \end{cases} \quad (4.2.6-1)$$

$$\varepsilon_{0T} = [1 + (1500T + 5T^2) \times 10^{-6}] \varepsilon_0 \quad (20^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C}) \quad (4.2.6-2)$$

式中  $\sigma$  —— 应力 (N/mm<sup>2</sup>)；

$\varepsilon$  —— 应变；

$f_{cT}$  —— 高温下普通混凝土的轴心抗压强度 (N/mm<sup>2</sup>)；

$\varepsilon_{0T}$  —— 高温下普通混凝土的峰值应变；

$\varepsilon_0$  —— 常温下普通混凝土的峰值应变，按《混凝土结构设计规范》GB 50010 确定。

**【条文说明】**国内外试验结果表明，高温下普通混凝土的应力—应变曲线总体呈现出随温度增加逐渐扁平的趋势，峰值点明显下移和右移。但若以峰值应力和相应的峰值应变对曲线进行无量纲化处理，则不同温度下混凝土的无量纲应力—应变曲线十分接近，且与常温时的无量纲应力—应变曲线相似。式（4.2.6-1）和式（4.2.6-2）出自文献“过镇海，李卫. 混凝土在不同应力—温度途径下的变形试验和本构关系. 土木工程学报, 1993, 26(5): 58-69”。该文献所提公式的适用范围原为 700℃以内，为统一起见将其拓展至 1000℃。虽然 700℃~1000℃区间的直接外延处理可能与实际情况存在误差，但混凝土在此温度区间已基本丧失力学性能，因此该误差对构件或结构高温力学行为造成的影响较为有限。

### 4.3 煤矸石混凝土

**4.3.1 高温下煤矸石混凝土的导热系数、比热容、密度分别按式（4.3.1-1）~式（4.3.1-3）。**

$$\lambda_{cT} = 0.454 + 0.14r_c + (0.0223 + 0.06r)(T/100) \quad (20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C}) \quad (4.3.1-1)$$

$$C_{cT} = \begin{cases} 0.68 + 0.1r_c + 0.043(T/100) & 20^\circ\text{C} \leq T < 550^\circ\text{C} \\ A_c(T/100)^2 - B_c(T/100) + D_c & 550^\circ\text{C} \leq T < 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.3.1-2)$$

$$\rho_{cT} = \begin{cases} (1-0.054r_c) \left[ 1 - 2.6 \left( \frac{T}{10000} \right) \right] \rho_c & 20^\circ\text{C} \leq T < 200^\circ\text{C} \\ (1-0.054r_c) \left[ 0.97 - 0.76 \left( \frac{T}{10000} \right) \right] \rho_c & 200^\circ\text{C} \leq T < 600^\circ\text{C} \\ (1-0.054r_c) \left[ 1 - 1.38 \left( \frac{T}{10000} \right) \right] \rho_c & 600^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.3.1-3)$$

式中  $\lambda_{cT}$  ——高温下煤矸石混凝土的导热系数 [W/(m·°C)];

$c_{cT}$  ——高温下煤矸石混凝土的比热容 [J/(kg·°C)];

$\rho_{cT}$  ——高温下煤矸石混凝土的密度 (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_c$  ——常温下普通混凝土的密度, 可取 2400 kg/m<sup>3</sup>;

$r_c$  ——煤矸石骨料取代率;

$A_c$ 、 $B_c$ 、 $D_c$  ——具体取值见表 4.3.1。

表 4.3.1 参数  $A_c$ 、 $B_c$ 、 $D_c$  的取值

取代率	$A_c$	$B_c$	$D_c$
25%	0.011	1.42	5.48
50%	0.014	1.81	7.71
75%	0.013	1.65	6.19
100%	0.014	1.75	6.41

注: 对于其它取代率情况, 可插值获得各参数取值。

**【条文说明】**由于煤矸石混凝土粗骨料的特殊性及其制备方式的差异, 在遭受火灾作用时所表现出的热工性能与普通混凝土会有较大不同。式 (4.3.1-1) 和式 (4.3.1-3) 出自文献 “Gao G, Wen B, Li Y, et al. Effect of temperature on thermal properties and residual strength of coal gangue concrete[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 53: 103792.”

**4.3.2** 高温下煤矸石混凝土的轴心抗压强度按式 (4.3.2-1) ~式 (4.3.2-5) 计算:

$$f_{cp}^T = C f_{cc}^T \quad (4.3.2-1)$$

$$C = -2.82 \times \frac{T}{10000} + 0.824 \quad (4.3.2-2)$$

$$f_{cc}^T = \begin{cases} \frac{1}{w/c} (2.1r^2 - 5.4r + 22.5) & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 300^\circ\text{C} \\ \frac{1}{w/c} (2.1r^2 - 5.4r + 22.5) \left( A \times \frac{T}{10000} + B \right) & 300^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.3.2-3)$$

$$A_{cc} = 4.32r - 16 \quad (4.3.2-4)$$

$$B_{cc} = -0.08r + 1.5 \quad (4.3.2-5)$$

式中  $f_{cp}^T$  —— 高温下煤矸石混凝土的轴心抗压强度 (MPa);

$f_{cc}^T$  —— 高温下煤矸石混凝土的立方体抗压强度 (MPa);

$C$  —— 含温度的计算式;

$w/c$  —— 混凝土水灰比;

$A_{cc}$ 、 $B_{cc}$  —— 煤矸石混凝土抗压强度的相关参数。

【条文说明】根据高温下煤矸石混凝土抗压强度的试验值，考虑水灰比、取代率和温度三种参数。随温度升高普通混凝土的轴心抗压强度总体呈现出逐渐降低的趋势。文献“高冠一. 煤矸石混凝土高温性能及结构耐火性能研究. 西安：西安建筑科技大学博士学位论文，2025”对不同煤矸石粗骨料取代率的煤矸石混凝土进行火灾下单轴受压性能进行测试，获得了不同温度下煤矸石混凝土轴心抗压强度均值，在此基础上建立了式（4.3.2）的主体部分。

4.3.3 高温下煤矸石混凝土的弹性模量按式（4.3.3）计算：

$$E_{r,T} = \begin{cases} \left[ (-0.18r + 1) \left[ \frac{1.5T}{1000} + 6.3 \left( \frac{T}{10000} \right)^2 + 1.09 \right] \right] & 25^\circ\text{C} \leq T \leq 500^\circ\text{C} \\ \left[ (0.75r + 1) \left[ \frac{1.5T}{1000} + 6.3 \left( \frac{T}{10000} \right)^2 + 1.09 \right] \right] & 500^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.3.3)$$

式中  $E_{r,T}$  —— 高温下煤矸石混凝土弹性模量。

【条文说明】煤矸石混凝土的弹性模量随温度的升高而降低且明显分为两个阶段，在受火温度 600 °C 曲线出现拐点。受火温度超过 500 °C 后，含煤矸石骨料混凝土内部产生的 C-A-S-H 凝胶物质会对混凝土内部的孔隙产生一定的填充作用，因此煤矸石混凝土的弹性模量会随着骨料取代率的增加而增加。式（4.3.3）主要出自文献“高冠一. 煤矸石混凝土高温性能及结构耐火性能研究. 西安：西安建筑科技大学博士学位论文，2025”。

4.3.4 高温下煤矸石混凝土的应力—应变关系按式（4.3.4-1）~式（4.3.4-3）计算：

$$\sigma = E_c (1 - 0.146r) (1 - D_T) (1 - D_l) \varepsilon^T \quad (4.3.4-1)$$

$$D_T = 1 - \frac{E_{r,T}}{E_{r,0}} \quad (4.3.4-2)$$

$$D_l = \begin{cases} 0 & 0 < \varepsilon^T \leq \varepsilon_k^T \\ a_c + b_c \ln(\varepsilon^T + c_c) & \varepsilon_k^T < \varepsilon^T \leq \varepsilon_p^T \\ K(\varepsilon^T)^2 + L(\varepsilon^T) + M\varepsilon^T + N & \varepsilon_p^T < \varepsilon^T \leq \varepsilon_u^T \end{cases} \quad (4.3.4-3)$$

式中  $E_c$  —— 普通混凝土弹性模量 (MPa) ;

$D_T$ ——混凝土温度损伤；

$D_l$ ——混凝土荷载损伤；

$E_{r,T}$ ——不同温度下煤矸石混凝土初始模量，按式（4.3.3）计算；

$E_{r,0}$ ——室温下煤矸石混凝土初始模量，按式（4.3.3）计算；

$a_c$ 、 $b_c$ 、 $c_c$ 、 $K$ 、 $L$ 、 $M$ 、 $N$ ——损伤参数，按表 4.3.4 取值。

表 4.3.4 式（4.3.4-3）参数取值

取代率 (%)	温度 (°C)	$a_c$	$b_c$	$C_c (\times 10^{-3})$	$K (\times 10^6)$	L	M	N
0	20	1.30	0.122	-0.381	-6.20	52300	67.6	0.157
	200	1.76	0.209	-0.0833	4.10	-90600	652	-0.700
	300	1.52	0.174	-0.322	1.41	-42100	420	-0.396
	400	1.50	0.172	-0.474	-3.51	61400	-206	0.604
	500	1.89	0.248	-0.523	-1.52	43800	-309	1.21
	600	0.566	0.068	-1.80	-0.29	10900	-54.7	0.155
	700	0.833	0.102	-2.07	-0.108	5400	-41.7	0.355
	800	0.989	0.152	-1.18	-0.521	2060	21.2	-0.0271
25	20	1.64	0.169	-0.327	1.11	-34300	342	-0.118
	200	1.29	0.122	-0.290	5.20	-88600	545	-0.365
	300	1.56	0.173	-0.392	-8.03	133000	-522	1.10
	400	1.75	0.210	-0.346	-3.77	72600	-291	0.799
	500	1.41	0.156	-0.924	0.150	-7930	154	-0.119
	600	0.425	0.047	-1.92	-0.331	10700	-34.8	0.0771
	700	0.937	0.121	-2.08	-0.204	10200	-101	0.563
	800	1.09	0.139	-1.83	-0.225	11400	-124	0.739
50	20	1.34	0.117	-0.418	-0.884	3980	115	0.287
	200	1.17	0.0994	-0.355	2.52	-59300	488	-0.451
	300	1.38	0.138	-0.386	1.16	-32600	328	-0.211
	400	1.39	0.138	-0.525	0.837	-29100	345	-0.452
	500	1.32	0.148	-0.751	0.267	-13200	228	-0.399
	600	1.07	0.120	-1.36	-0.514	25200	-311	1.62
	700	1.13	0.166	-1.03	-0.154	71600	-52.4	0.346
	800	1.18	0.189	-0.993	-0.0482	2380	4.74	0.0809
75	20	1.36	0.118	-0.260	-5.50	84500	-286	0.886

	200	1.46	0.143	-0.459	1.82	-46100	409	-0.319
	300	1.46	0.157	-0.452	1.17	-37400	410	-0.605
	400	1.36	0.131	-0.493	0.244	-11200	180	-0.0208
	500	1.67	0.216	-0.610	-1.53	51200	-422	1.55
	600	2.06	0.336	0.524	-0.0324	606	41.7	0.100
	700	2.22	0.413	2.27	-0.161	7710	-61.6	0.386
	800	1.13	0.155	-1.99	-0.0209	1200	5.47	0.223
100	20	1.77	0.189	-0.326	-3.91	58900	-163	0.696
	200	1.39	0.130	-0.493	0.682	-24100	290	-0.120
	300	1.38	0.150	-0.612	1.56	-51300	563	-1.15
	400	1.46	0.149	-0.652	0.308	6460	15.3	0.416
	500	1.50	0.186	-0.856	0.0861	-5560	132	-0.168
	600	1.05	0.132	-1.45	0.00226	-1330	75.8	-0.153
	700	0.926	0.116	-1.56	-0.0504	2240	7.08	0.183
	800	1.87	0.346	1.57	-0.0224	1460	-1.88	0.215

注：对于其它取代率情况，可插值获得各参数取值。

【条文说明】火灾作用下煤矸石混凝土单轴受压的损伤变量由骨料取代率、受火温度和荷载三种损伤组成。采用平行柱法得出的损伤本构误差在 15%以内，吻合度较高。式（4.3.4）主要出自文献“高冠一. 煤矸石混凝土高温性能及结构耐火性能研究. 西安：西安建筑科技大学博士学位论文，2025”。

#### 4.4 废玻璃混凝土

4.4.1 高温下废玻璃混凝土的导热系数、比热容分别按式（4.4.1-1）~式（4.4.1-2）。

$$\lambda_{cT} = 1.48 - 1.30\omega + (12.72\omega - 6.31)10^{-4}T \quad (20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C}) \quad (4.4.1-1)$$

$$C_{cT} = \begin{cases} 0.80 + 10^{-4}(2.50 + 14.78\omega)T & 180^{\circ}\text{C} \leq T < 200^{\circ}\text{C} \\ 0.27 - 0.62\omega + 10^{-3}(1.95 + 3.66\omega)T & 200^{\circ}\text{C} \leq T < 400^{\circ}\text{C} \\ 4.98 + 23.26\omega - 10^{-2}(1.60 + 8.59\omega)T + 10^{-5}(1.61 + 8.02\omega)T^2 & 400^{\circ}\text{C} < T \leq 580^{\circ}\text{C} \\ 0.12 - 5.59\omega + 21.08\omega^2 + 10^{-3}(1.55 + 9.00\omega - 30.83\omega^2)T & 580^{\circ}\text{C} < T < 720^{\circ}\text{C} \\ 3.38 + 17.22\omega - 58.56\omega^2 - 10^{-3}(2.94 + 21.60\omega - 76.38\omega^2)T & 720^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (4.4.1-2)$$

式中  $\lambda_{cT}$  —— 高温下废玻璃混凝土的导热系数 [W/(m·°C)];

$c_{cT}$  —— 高温下废玻璃混凝土的比热容 [J/(kg·°C)];

$\omega$  —— 混凝土中玻璃的质量占比。

【条文说明】研究表明，随着废玻璃掺量的增加，混凝土导热系数降低，比

热容增大。这是由于玻璃热导率（0.93 W/mK）低于天然河砂（约 3.00 W/mK）。式（4.4.1）出自文献“Wen B, Wang H, Gao G, et al. The Synergistic Utilization of Glass Aggregates and Glass Powder on the Thermal and Mechanical Properties of Concrete[J]. Materials, 2025, 18(10): 2405.”

4.4.2 高温下废玻璃混凝土的轴心抗压强度按式（4.4.2-1）~式（4.4.2-5）计算：

$$\eta_{cT} = (1 - 0.58r_{GP})C\eta_{cc} \quad (4.4.2-1)$$

$$C = -4.32 \times \frac{T}{10000} + 0.89 \quad (4.4.2-2)$$

$$\eta_{cc} = \begin{cases} 1 - 0.14r_{GS} + \frac{A_G T}{39523.64} & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}, 0 \leq r_{GS} \leq 1 \\ 0.63 + 0.01A_G + \frac{(971.43 - 17.58A_G - B_G T)T}{395236.4} & 200^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C}, 0 \leq r_{GS} < 0.6 \\ 0.66 + 0.01A_G + \frac{(496.48 - 8.1A_G - B_G T)}{395236.4} & 200^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C}, 0.6 \leq r_{GS} \leq 1 \end{cases} \quad (4.4.2-3)$$

$$A_G = \begin{cases} 7.25 + 55.7r_{GS} & 0 \leq r_{GS} < 0.6 \\ 73.15 - 59.88r_{GS} & 0.6 \leq r_{GS} \leq 1 \end{cases} \quad (4.4.2-4)$$

$$B_G = \begin{cases} 1.26 - 0.65r_{GS} & 0 \leq r_{GS} < 0.6 \\ 0.63 + 0.29r_{GS} & 0.6 \leq r_{GS} \leq 1 \end{cases} \quad (4.4.2-5)$$

式中  $\eta_{cT}$  —— 高温下废玻璃混凝土的轴心抗压强度折减系数；  
 $\eta_{cc}$  —— 高温下废玻璃混凝土的立方体抗压强度折减系数；  
 $C$  —— 含温度的计算式；  
 $r_{GP}$  —— 玻璃粉取代率；  
 $r_{GS}$  —— 玻璃砂取代率；

$A_G$ 、 $B_G$  —— 废玻璃混凝土抗压强度的相关参数。

【条文说明】根据国内外研究表明，在相同水灰比条件下，单掺玻璃粉混凝土和复掺玻璃混凝土的抗压强度衰减率与玻璃粉取代率均呈线性相关。跟据试验研究获得了不同温度下废玻璃混凝土轴心抗压强度的折减系数均值，在此基础上建立了式（4.4.2）的主体部分。

4.4.3 高温下废玻璃混凝土的弹性模量按式（4.4.3-1）~式（4.4.3-2）计算：

$$E_{r,0} = \left(1 - \frac{1.53r_{GP}}{1000}\right) \left(1 - \frac{1.64r_{GS}}{1000}\right) E_0 \quad (4.4.3-1)$$

$$E_{r,T} = \left(1.023 - \frac{1.38T}{1000}\right) E_{r,0} \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad (4.4.3-2)$$

式中  $E_{r,0}$  —— 常温下废玻璃混凝土弹性模量；

$E_0$  —— 常温下普通混凝土弹性模量，按式(4.3.3)取值；

$E_{r,T}$  —— 高温下废玻璃混凝土弹性模量。

【条文说明】废玻璃混凝土弹性模量随温度呈降低趋势，600℃后因玻璃发生熔融软化，弹性模量降低趋势与普通混凝土相比更为明显。跟据试验研究获得了不同温度下废玻璃混凝土弹性模量预测公式，在此基础上建立了式（4.4.3）的主体部分。

4.4.4 高温下废玻璃混凝土的应力—应变关系按式（4.4.4-1）~式（4.4.4-3）计算：

$$\sigma = (1 - D_T)(1 - D_G)E_0 \varepsilon e^{\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^\beta\right]} \quad (4.4.4-1)$$

$$D_T = \frac{1.25T}{1000} - 0.025 \quad (4.4.4-2)$$

$$D_{G,20^\circ\text{C}} \begin{cases} 1 - \left[ \left(1 - \frac{1.53r_{GP}}{1000}\right) \left(1 - \frac{1.55r_{GS}}{1000}\right) \right] & 0 \leq r_{GP} \leq 20\%, 0 \leq r_{GS} \leq 60\% \\ 1 - \left[ \left(1 - \frac{1.53r_{GP}}{1000}\right) \left(1.06 - \frac{2.21r_{GS}}{1000}\right) \right] & 0 \leq r_{GP} \leq 20\%, 60\% \leq r_{GS} \leq 100\% \end{cases} \quad (4.4.4-3)$$

$$D_{G,200^\circ\text{C}} \begin{cases} 1 - \left[ \left(1 - \frac{6.95r_{GP}}{1000}\right) \left(1 + \frac{1.72r_{GS}}{1000}\right) \right] & 0 \leq r_{GP} \leq 20\%, 0 \leq r_{GS} \leq 60\% \\ 1 - \left[ \left(1 - \frac{6.95r_{GP}}{1000}\right) \left(1.36 - \frac{4.46r_{GS}}{1000}\right) \right] & 0 \leq r_{GP} \leq 20\%, 60\% \leq r_{GS} \leq 100\% \end{cases} \quad (4.4.4-4)$$

$$D_{G,400^\circ\text{C}} \begin{cases} 1 - \left[ \left(1 - \frac{3.13r_{GP}}{1000}\right) \left(1 - \frac{2.11r_{GS}}{1000}\right) \right] & 0 \leq r_{GP} \leq 20\%, 0 \leq r_{GS} \leq 60\% \\ 1 - \left[ \left(1 - \frac{3.13r_{GP}}{1000}\right) \left(1.05 - \frac{2.64r_{GS}}{1000}\right) \right] & 0 \leq r_{GP} \leq 20\%, 60\% \leq r_{GS} \leq 100\% \end{cases} \quad (4.4.4-5)$$

$$D_{G,600^\circ\text{C}} \begin{cases} 1 - \left[ \left(1 - \frac{3.99r_{GP}}{1000}\right) \left(1.04 - \frac{9.78r_{GS}}{1000}\right) \right] & 0 \leq r_{GP} \leq 20\%, 0 \leq r_{GS} \leq 60\% \\ 1 - \left[ \left(1 - \frac{3.99r_{GP}}{1000}\right) \left(0.53 - \frac{1.94r_{GS}}{1000}\right) \right] & 0 \leq r_{GP} \leq 20\%, 60\% \leq r_{GS} \leq 100\% \end{cases} \quad (4.4.4-6)$$

$$D_{G,800^{\circ}\text{C}} \begin{cases} 1 - \left[ \left( 1 - \frac{15.28r_{GP}}{1000} \right) \left( 0.99 - \frac{8.05r_{GS}}{1000} \right) \right] & 0 \leq r_{GP} \leq 20\%, 0 \leq r_{GS} \leq 60\% \\ 1 - \left[ \left( 1 - \frac{15.28r_{GP}}{1000} \right) \left( 0.6 - \frac{1.52r_{GS}}{1000} \right) \right] & 0 \leq r_{GP} \leq 20\%, 60\% \leq r_{GS} \leq 100\% \end{cases} \quad (4.4.4-7)$$

式中

$D_T$  ——混凝土温度损伤；

$D_G$  ——混凝土骨料损伤，也可按表 4.4.4-1 取值；

$\beta$ 、 $\lambda$  ——损伤参数，按表 4.4.4-2 取值。

**【条文说明】**废玻璃混凝土高温下损伤可分为三部分：1) 由高温引起混凝土化学损伤；2) 玻璃表面光滑特性和高温熔融引起的物理损伤；3) 荷载持续压缩引起的混凝土物理损伤。采用统计法得出的废玻璃混凝土的损伤本构模型。

表 4.4.4-1 参数  $D_G$  的取值

取代率		20°C			200°C			400°C			600°C			800°C		
		$r_{GP}$														
		0	10	20	0	10	20	0	10	20	0	10	20	0	10	20
$r_{GS}$	0	0	0.015	0.031	0	0.070	0.139	0	0.031	0.063	0	0.001	0.043	0	0.161	0.313
	20	0.031	0.046	0.061	-0.034	0.037	0.109	0.042	0.072	0.102	0.156	0.189	0.223	0.171	0.298	0.424
	40	0.062	0.076	0.091	-0.069	0.005	0.080	0.084	0.113	0.142	0.351	0.377	0.403	0.332	0.434	0.536
	60	0.093	0.107	0.121	-0.103	-0.027	0.050	0.127	0.154	0.181	0.547	0.565	0.583	0.493	0.570	0.648
	80	0.117	0.131	0.144	-0.003	0.067	0.136	0.161	0.187	0.214	0.625	0.640	0.655	0.522	0.595	0.668
	100	0.161	0.174	0.187	0.086	0.150	0.213	0.214	0.239	0.263	0.664	0.677	0.691	0.552	0.620	0.689

注：对于其它取代率情况，可插值获得各参数取值。

表 4.4.4-2 参数 $\beta$ 、 $\lambda$ 的取值

取代率		20°C	200°C	400°C	600°C	800°C
0%	$\beta$	10.53	22.45	2.79	1.77	3.74
	$\lambda(\times 10^{-3})$	1.49	1.92	3.65	7.06	27.31
20%	$\beta$	7.41	19.61	2.71	1.24	2.68
	$\lambda(\times 10^{-3})$	1.60	1.92	3.89	7.05	27.79
40%	$\beta$	6.71	8.23	2.61	1.33	4.03
	$\lambda(\times 10^{-3})$	1.63	2.34	4.07	8.64	19.53
60%	$\beta$	6.71	36.56	2.49	1.35	2.67
	$\lambda(\times 10^{-3})$	1.63	1.80	4.10	10.65	21.68
80%	$\beta$	12.40	20.17	2.54	1.30	1.62
	$\lambda(\times 10^{-3})$	1.43	1.92	4.19	12.60	23.63
100%	$\beta$	19.37	165.39	2.85	1.45	1.89
	$\lambda(\times 10^{-3})$	1.38	1.69	4.12	12.99	19.77

注：对于其它取代率情况，可插值获得各参数取值。

## 5 普通混凝土构件

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 高温下普通混凝土构件的承载力计算可采用常温下普通混凝土构件承载力极限状态的计算原则和方法,但钢筋和混凝土的力学性能需依据截面温度场进行相应的修正。构件高温承载力计算过程中,钢筋和混凝土的常温强度采用标准值。

【条文说明】根据已有试验研究和理论分析,高温下普通混凝土构件的破坏形态以及相应的截面应变和应力分布等都与常温构件类似,因此常温构件的承载力计算原则和方法也适用于高温构件。由于火灾的发生为小概率事件,计算过程中钢筋和混凝土的常温强度采用标准值是适宜的。

**5.1.2** 高温下普通混凝土构件的截面可近似以缩减后的有效截面予以等效,有效截面根据附录 C 公式 C.1.2、C.1.3 进行确定。

【条文说明】参考 Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 和文献“过镇海,时旭东.钢筋混凝土的高温性能及其计算.北京:清华大学出版社,2003”制定本条。

### 5.2 梁

**5.2.1** 当普通混凝土简支梁的梁宽以及纵向受拉钢筋的保护层厚度不小于表 5.2.1 的规定,同时角部受拉钢筋的梁侧保护层厚度不小于表 5.2.1 中数值加上 10 mm 时,梁满足相应的耐火极限要求。

表 5.2.1 简支梁梁宽和纵向受拉钢筋保护层厚度的最小值

耐火极限 (min)	梁宽 (mm) / 纵向受拉钢筋的保护层厚度 (mm)			
60	120 / 30	160 / 25	200 / 20	300 / 20
90	150 / 45	200 / 35	300 / 30	400 / 25
120	200 / 55	240 / 50	300 / 45	500 / 40

【条文说明】梁宽最小值取自 Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 第 5.6.2 和 5.6.3 条。纵向受拉钢筋的保护层厚度最小值则是根据《混凝土结构设计规范》GB 50010 有关钢筋最小保护层厚度的要求,参考 Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 第 5.6.2 和 5.6.3 条而得。

**5.2.2** 当普通混凝土连续梁的梁宽以及纵向受拉钢筋的保护层厚度不小于表

5.2.2 的规定,同时角部受拉钢筋的梁侧保护层厚度不小于表 5.2.2 中数值加上 10 mm 时,梁满足相应的耐火极限要求。

表 5.2.2 连续梁梁宽和纵向受拉钢筋保护层厚度的最小值

耐火极限 (min)	梁宽 (mm) / 纵向受拉钢筋的保护层厚度 (mm)			
60	120 / 20	—	—	—
90	150 / 25	250 / 20	—	—
120	200 / 35	300 / 25	450 / 25	500 / 20

【条文说明】梁宽最小值取自 Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 第 5.6.2 和 5.6.3 条。纵向受拉钢筋的保护层厚度最小值则是根据《混凝土结构设计规范》GB 50010 有关钢筋最小保护层厚度的要求,参考 Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 第 5.6.2 和 5.6.3 条而得。

5.2.3 普通混凝土梁的耐火极限可按式 (5.2.4) 近似计算,式 (5.2.4) 适用于梁纵向受拉钢筋配筋率  $0.5\% \leq \rho_t \leq 1.5\%$  的情况。

$$R_T = \frac{0.86c + 19.58}{(M/M_u)^2 - 0.064(M/M_u) + 0.12}$$

(20 mm  $\leq c \leq$  50 mm; 0.2  $\leq M/M_u \leq$  0.7) (5.2.4)

- 式中  $R_T$  —— 耐火极限 (min);
- $M$  —— 常温下按简支梁计算的梁跨中组合弯矩 (kN·m);
- $M_u$  —— 常温下梁跨中受弯承载力 (kN·m), 计算时钢筋和混凝土强度采用标准值;
- $c$  —— 混凝土保护层厚度 (mm)。

【条文说明】本条根据承载能力极限状态对普通混凝土梁进行耐火设计。

5.2.4 普通混凝土梁的高温承载力可采用常温方法针对缩减后的有效截面进行计算,也可采用附录 A 的高级计算方法进行确定,再根据第 3.1.2 条和第 3.3.1 条进行普通混凝土梁的耐火设计。

【条文说明】式 (5.2.4) 出自文献“吴波,洪洲. 钢筋混凝土简支梁的耐火极限. 华南理工大学学报, 2006, 34(7): 82-87”。考虑到现行《建筑设计防火规范》GB 50016 中有关普通混凝土梁的耐火极限表格数据均是基于简支梁的研究结果,为实现与现行设计标准的衔接和过渡,在对简支梁耐火极限进行大量数值分析和一定试验验证的基础上,建立了式 (5.2.4),荷载比 ( $M/M_u$ ) 对梁耐火极限的显著影响在该式中得到了明确体现。对于非简支梁的情况,按简支梁计算得到的梁跨中组合弯矩  $M$  一般比实际情况偏大,这对耐火设计是偏安全的。至

于非简支梁情况下梁端约束可能对梁耐火极限产生的有利影响，鉴于目前研究成果相对较少且涉及到梁端相邻构件的火灾行为较为复杂，留待成熟后再做考虑。

常温下按简支梁计算的梁跨中组合弯矩  $M$  可利用一般设计软件进行计算，计算时梁与两端相邻构件之间设为铰接连接方式。

### 5.3 柱

**5.3.1** 当普通混凝土矩形柱的截面尺寸或圆柱截面直径，以及纵向受力钢筋的保护层厚度不小于表 5.3.1 的规定且符合以下条件时，柱满足相应的耐火极限要求：

- 1 柱的计算长度不大于 3.0 m；
- 2 纵向受力钢筋的总配筋率小于 4%；

3 组合轴向压力作用点至经过矩形柱截面重心的  $z$  轴的距离  $e_{0y} \leq 0.4 h$ ，至经过矩形柱截面重心的  $y$  轴的距离  $e_{0z} \leq 0.4 b$ ，具体见图 5.3.4；或组合轴向压力作用点至圆柱截面重心的距离不大于截面直径的 40%。

表 5.3.1 截面尺寸（直径）和纵向受力钢筋保护层厚度的最小值

耐火极限 (min)	截面尺寸（直径）(mm) / 纵向受力钢筋的保护层厚度 (mm)			
	多面受火			单面受火
	$\mu = 0.2$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.7$	$\mu = 0.7$
60	200 / 20	200 / 25 300 / 20	250 / 35 350 / 30	200 / 20
	200 / 25 300 / 20	300 / 35 400 / 30	300 / 45 400 / 40	200 / 20
120	250 / 30 350 / 25	350 / 35 450 / 30	350 / 50 450 / 45	200 / 25
	350 / 35 450 / 30 550 / 25	450 / 45 550 / 40 650 / 35	450 / 60 550 / 55 650 / 50	250 / 45 350 / 40 450 / 35

注： $\mu$  为组合轴向压力与该力作用点处柱常温轴向承载力之比，对于矩形柱，后者可利用式 (5.3.4-2) 计算，计算时材料强度采用标准值。

**【条文说明】** 参考 Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 表 5.2.a，并根据《混凝土结构设计规范》GB 50010 有关钢筋最小保护层厚度的要求，对表中纵向受拉钢筋的保护层厚度进行了适当调整。

**5.3.2** 当普通混凝土异形柱的截面肢厚和肢高不小于表 5.3.2 的规定且符合以下条件时，柱满足相应的耐火极限要求：

- 1 纵向受力钢筋的总配筋率不小于 0.6%；
- 2 纵向受力钢筋的保护层厚度不小于 30 mm；
- 3 组合轴向压力作用点至截面重心的距离与截面回转半径之比不大于 2.0；

4 柱的计算长度不大于 4.0 m。

表 5.3.2 截面肢厚和肢高的最小值

耐火极限 (min)	肢厚 (mm) / 肢高 (mm)		
	$\mu = 0.2$	$\mu = 0.45$	$\mu = 0.7$
60	200 / 500	200 / 500	200 / 600、250 / 500
90	200 / 500	200 / 500	250 / 1000
120	200 / 500	200 / 650、250 / 500	300 / 1200
180	200 / 500	250 / 1000	采取特殊措施

注： $\mu$  为组合轴向压力与该力作用点处柱常温轴向承载力之比，后者可利用式 (5.3.5-2) 计算，计算时材料强度采用标准值。

【条文说明】在横截面积相同的情况下，异形柱因截面周长较长导致火灾作用下受火表面积大于矩形柱和圆柱，耐火性能明显偏弱。在系列足尺明火试验和大量数值分析结果的基础上，综合给出了表 5.3.2。

5.3.3 普通混凝土矩形柱的耐火极限可按式 (5.3.4-1) 近似计算：

$$R_T = \beta_\mu \beta_L \beta_{\text{hdb}} \beta_b \beta_e \beta_\rho \quad (5.3.4-1)$$

式中  $R_T$  —— 耐火极限 (min)；

$\mu$  —— 组合轴向压力与该力作用点处柱常温轴向承载力之比，其中后者可利用式 (5.3.4-2) 计算，计算时材料强度采用标准值；

$L$  —— 柱的计算长度 (m)；

$h$ 、 $b$  —— 柱的截面高度和截面宽度 (m)；

$\rho$  —— 全截面纵向受力钢筋配筋率；

$e$  ——  $e = e_0 / r_a$  为偏心率，其中  $e_0 = \sqrt{e_{0y}^2 + e_{0z}^2}$  为组合轴向压力作用点至截面重心的距离， $r_a = \sqrt{I_a / A}$  为回转半径； $e_{0y}$  和  $e_{0z}$  分别为组合轴向压力作用点至经过截面重心的  $z$  轴和  $y$  轴的距离， $A$  为全截面面积， $a$  为组合轴向压力作用点至截面重心的连线与  $z$  轴的夹角（以逆时针方向为正）， $I_a$  为相对于  $z_a$  轴的截面惯性矩， $z_a$  轴经过截面重心，且与  $z$  轴的夹角等于  $a$  加  $90^\circ$ ，如图 5.3.4 所示；

$\beta_\mu$  ——  $\beta_\mu = c_1 \mu^2 + c_2 \mu + c_3$ ；

$\beta_L$  ——  $\beta_L = c_4 L + c_5$ ；

$\beta_{\text{hdb}}$  ——  $\beta_{\text{hdb}} = c_6 \left(\frac{h}{b}\right)^2 + c_7 \left(\frac{h}{b}\right) + c_8$ ；

$\beta_b$  ——  $\beta_b = c_9 b + c_{10}$ ；

$\beta_e$  ——  $\beta_e = c_{11} e^3 + c_{12} e^2 + c_{13} e + c_{14}$ ；

$\beta_\rho$  ——  $\beta_\rho = c_{15} \rho + c_{16}$ ；

$c_1 \sim c_{16}$  —— 具体取值见表 5.3.4-1。

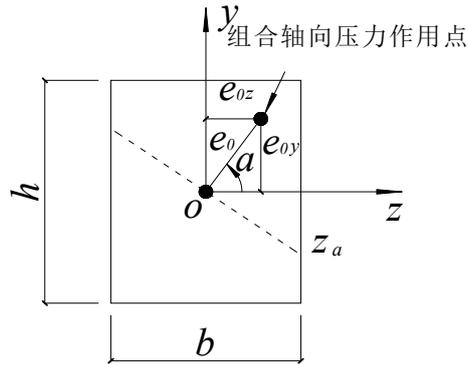


图 5.3.4 截面参数

表 5.3.4-1 参数  $c_1 \sim c_{16}$  的取值

参数	组合轴向压力作用点至截面重心的连线与 z 轴的夹角 $\alpha$				
	$0^\circ$	$22.5^\circ$	$45^\circ$	$67.5^\circ$	$90^\circ$
$c_1$	1.518	1.385	1.327	1.641	1.696
$c_2$	-2.690	-2.445	-2.328	-2.933	-3.225
$c_3$	1.355	1.231	1.167	1.490	1.693
$c_4$	-0.877	-0.901	-1.233	-1.141	-1.026
$c_5$	7.011	7.286	10.119	9.484	9.634
$c_6$	-0.666	-0.754	-1.046	-0.977	-0.326
$c_7$	3.138	3.322	4.242	3.852	3.251
$c_8$	2.058	1.824	1.146	0.060	-0.076
$c_9$	2.093	2.038	1.614	1.479	3.523
$c_{10}$	-0.277	-0.267	-0.209	-0.191	-0.443
$c_{11}$	-1.512	-1.688	-2.956	-1.532	-0.932
$c_{12}$	7.375	8.481	12.424	7.882	4.070
$c_{13}$	-13.285	-14.726	-18.366	-14.523	-6.727
$c_{14}$	23.334	25.565	31.138	29.643	11.166
$c_{15}$	5.547	5.859	4.656	5.880	3.920
$c_{16}$	1.141	1.144	0.896	1.241	1.210

组合轴向压力作用点处的矩形柱常温轴向承载力可按式 (5.3.4-2) 计算:

$$N_u = f_c A \varphi_L \varphi_{hdb} \varphi_b \varphi_e \varphi_p \quad (5.3.4-2)$$

式中  $N_u$  —— 组合轴向压力作用点处的柱常温轴向承载力 (N);

$f_c$  —— 常温下混凝土的轴心抗压强度 (N/mm<sup>2</sup>);

$A$  —— 全截面面积 (mm<sup>2</sup>);

$\varphi_L$  ——  $\varphi_L = d_1 L + d_2$ ;

$\varphi_{hdb}$  ——  $\varphi_{hdb} = d_3 (h/b)^2 + d_4 h/b + d_5$ ;

$\varphi_b$  ——  $\varphi_b = d_6 b + d_7$ ;

$\varphi_e$  ——  $\varphi_e = d_8 e^3 + d_9 e^2 + d_{10} e + d_{11}$ ;

$\varphi_p$  ——  $\varphi_p = d_{12}\rho + d_{13}$ ;  
 $d_1 \sim d_{13}$  —— 具体取值见表 5.3.4-2。

表 5.3.4-2 参数  $d_1 \sim d_{13}$  的取值

参数	组合轴向压力作用点至截面重心的连线与 $z$ 轴的夹角 $a$				
	0°	22.5°	45°	67.5°	90°
$d_1$	0.024	0.031	0.055	0.030	0.020
$d_2$	-1.311	-1.771	-3.195	-1.984	-1.793
$d_3$	-0.077	-0.128	-0.273	-0.259	-0.075
$d_4$	0.194	0.314	0.660	0.730	0.341
$d_5$	1.490	1.496	2.504	2.383	1.682
$d_6$	0.389	0.378	0.363	0.389	0.298
$d_7$	1.506	1.492	1.438	1.662	1.395
$d_8$	-0.739	-0.788	1.102	-1.104	-0.814
$d_9$	4.075	4.676	-7.664	7.378	4.568
$d_{10}$	-9.705	-11.539	20.455	-19.691	-11.215
$d_{11}$	12.123	14.005	-24.673	24.521	14.517
$d_{12}$	-0.282	-0.172	0.033	-0.047	-0.156
$d_{13}$	-0.023	-0.014	0.003	-0.004	-0.012

式 (5.3.4-1) 和 (5.3.4-2) 的适用范围为:  $2.0 \text{ m} \leq L \leq 4.0 \text{ m}$ 、 $0.3 \text{ m} \leq b \leq 0.6 \text{ m}$ 、 $b \leq h \leq 0.6 \text{ m}$ 、 $0.0 \leq e \leq 2.0$ 、 $1\% \leq \rho \leq 3\%$ 、 $0.2 \leq \mu \leq 0.7$ 。

【条文说明】本条根据承载能力极限状态对普通混凝土柱进行耐火设计。

5.3.4 普通混凝土等肢 L 形柱、T 形柱和十字形柱的耐火极限可按下式近似计算:

$$R_T = \beta_\mu \beta_L \beta_{\text{hdb}} \beta_b \beta_c \beta_\rho \quad (5.3.5-1)$$

式中  $R_T$  —— 耐火极限 (min) ;

$\mu$  —— 组合轴向压力与该力作用点处柱常温轴向承载力之比, 其中后者可利用式 (5.3.5-2) 计算, 计算时材料强度采用标准值;

$L$  —— 柱的计算长度 (m) ;

$h$ 、 $b$  —— 柱的截面肢高和截面肢厚 (m) ;

$\rho$  —— 全截面纵向受力钢筋配筋率;

$e$  ——  $e = e_0 / r_a$  为偏心率, 其中  $e_0 = \sqrt{e_{0y}^2 + e_{0z}^2}$  为组合轴向压力作用点至截面重心的距离,  $r_a = \sqrt{I_a / A}$  为回转半径;  $e_{0y}$  和  $e_{0z}$  分别为组合轴向压力作用点至经过截面重心的  $z$  轴和  $y$  轴的距离,  $A$  为全截面面积,  $a$  为组合轴向压力作用点至截面重心的连线与  $z$  轴的夹角 (以逆时针方向为正),  $I_a$  为相对于  $z_a$  轴的截面惯性矩,  $z_a$  轴经过截面重心, 且与  $z$  轴的夹角等于  $a$  加  $90^\circ$ , 如图 5.3.5 所示;

$\beta_\mu$  ——  $\beta_\mu = c_1 \mu^2 + c_2 \mu + c_3$  ;

$\beta_L$  ——  $\beta_L = c_4 L + c_5$  ;

$$\beta_{\text{hdb}} \text{ —— } \beta_{\text{hdb}} = c_6 \left( \frac{h}{b} \right)^2 + c_7 \left( \frac{h}{b} \right) + c_8 ;$$

$$\beta_b \text{ —— } \beta_b = c_9 b + c_{10} ;$$

$$\beta_e \text{ —— } \beta_e = c_{11} e^3 + c_{12} e^2 + c_{13} e + c_{14} ;$$

$$\beta_\rho \text{ —— } \beta_\rho = c_{15} \rho + c_{16} ;$$

$c_1 \sim c_{16}$  —— 具体取值见表 5.3.5-1。

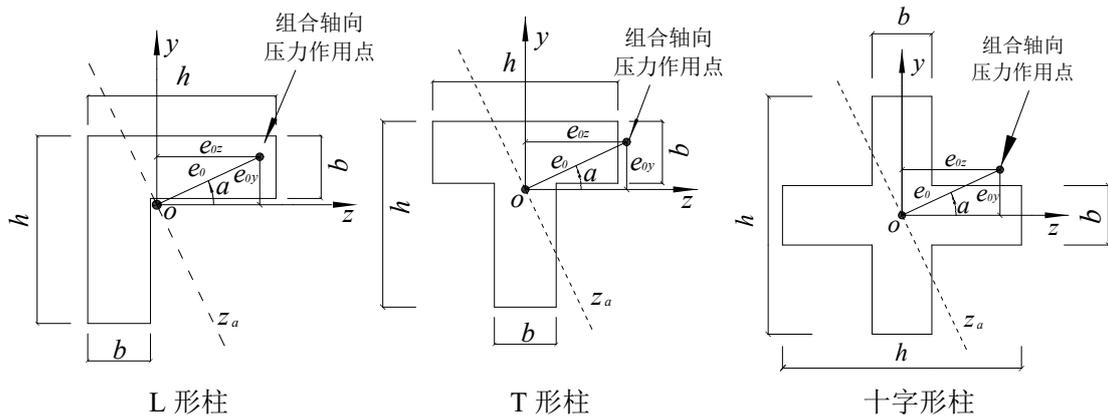


图 5.3.5 截面参数

注:  $z_{oy}$  为通过截面重心与柱肢平行的坐标系。

表 5.3.5-1 参数  $c_1 \sim c_{16}$  的取值

参数	组合轴向压力作用点至截面重心的连线与 $z$ 轴的夹角 $a$										
	L 形柱					T 形柱					十字形柱
	$-45^\circ$	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$135^\circ$	$-90^\circ$	$-45^\circ$	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$0^\circ$
$c_1$	8.055	9.038	7.655	2.153	2.759	9.111	8.801	11.922	2.689	8.512	6.513
$c_2$	-14.816	-17.220	-15.939	-4.419	-5.586	-19.387	-17.195	-23.128	-5.440	-19.156	-12.149
$c_3$	8.143	9.615	9.592	2.566	3.163	11.302	9.822	12.883	3.076	11.757	6.423
$c_4$	-1.854	-1.700	-1.472	-0.950	-1.438	-0.690	-2.364	-1.517	-1.067	-1.973	-1.116
$c_5$	21.850	22.092	22.127	10.067	15.000	13.167	30.312	18.912	14.380	25.645	12.220
$c_6$	-0.178	-0.160	-0.0207	-0.234	-0.165	-0.271	-0.294	-0.217	-0.141	-0.0227	-0.398
$c_7$	2.307	1.813	0.215	2.556	1.863	2.460	2.978	2.366	1.460	0.217	3.897
$c_8$	1.005	0.593	0.182	0.578	0.248	0.986	2.339	2.937	1.794	0.0683	5.090
$c_9$	0.206	0.227	1.356	3.046	2.080	0.186	0.0662	0.0591	1.235	1.958	0.194
$c_{10}$	-0.00981	-0.00946	-0.0655	-0.189	-0.140	-0.00797	-0.00330	-0.00305	-0.0632	-0.104	-0.0117
$c_{11}$	-0.208	-0.233	0.747	1.278	1.226	-0.645	1.120	-0.554	-0.465	2.816	-2.315
$c_{12}$	1.429	1.146	-2.165	-3.504	-3.638	2.438	-1.583	3.611	1.780	-7.599	8.617
$c_{13}$	-2.570	-1.741	1.852	1.610	1.943	-2.793	-2.530	-6.995	-2.423	3.244	-9.750
$c_{14}$	8.254	7.891	8.040	3.810	5.422	9.950	11.505	17.769	7.822	5.912	12.393
$c_{15}$	8.356	8.730	7.789	9.101	6.950	4.393	7.307	7.119	5.653	7.150	6.886
$c_{16}$	1.119	1.151	1.356	1.379	1.180	1.392	1.239	1.232	1.220	1.390	1.331

组合轴向压力作用点处的异形柱常温轴向承载力可按式 (5.3.5-2) 计算:

$$N_u = f_c A \varphi_L \varphi_{\text{hdb}} \varphi_b \varphi_e \varphi_\rho \quad (5.3.5-2)$$

式中  $N_u$  —— 组合轴向压力作用点处的柱常温轴向承载力 (N)；

$f_c$  —— 常温下混凝土的轴心抗压强度 (N/mm<sup>2</sup>)；

$A$  —— 全截面面积 (mm<sup>2</sup>)；

$\varphi_L$  ——  $\varphi_L = d_1 L + d_2$ ；

$\varphi_{hdb}$  ——  $\varphi_{hdb} = d_3 (h/b)^2 + d_4 h/b + d_5$ ；

$\varphi_b$  ——  $\varphi_b = d_6 b + d_7$ ；

$\varphi_e$  ——  $\varphi_e = d_8 e^3 + d_9 e^2 + d_{10} e + d_{11}$ ；

$\varphi_\rho$  ——  $\varphi_\rho = d_{12} \rho + d_{13}$ ；

$d_1 \sim d_{13}$  —— 具体取值见表 5.3.5-2。

式 (5.3.5-1) 和式 (5.3.5-2) 的适用范围为：2.0 m ≤ L ≤ 4.0 m、0.0 ≤ e ≤ 2.0、1% ≤ ρ ≤ 3%、0.2 ≤ μ ≤ 0.7、0.2 m ≤ b ≤ 0.25 m、b ≤ h ≤ 1.0 m。

表 5.3.5-2 参数  $d_1 \sim d_{13}$  的取值

参 数	组合轴向压力作用点至截面重心的连线与 z 轴的夹角 $\alpha$										
	L 形柱					T 形柱					十字形柱
	-45°	0°	45°	90°	135°	-90°	-45°	0°	45°	90°	0°
$d_1$	-0.0207	-0.00965	-0.0186	-0.0162	-0.0286	-0.0124	-0.0241	-0.0260	-0.0211	-0.00899	-0.0357
$d_2$	1.710	1.141	3.003	1.265	2.191	1.863	2.938	2.679	2.460	1.305	3.446
$d_3$	-0.00208	-0.00917	-0.00004	0.0421	0.000225	0.0274	-0.00022	0.000054	0.000348	0.000826	-0.00332
$d_4$	0.199	0.0568	0.000050	-0.180	-0.00262	-0.169	0.00102	-0.00069	-0.00263	-0.00704	0.146
$d_5$	6.210	-1.510	-0.0373	17.554	-0.0489	2.213	-0.0315	-0.0655	-0.0885	-0.0707	19.164
$d_6$	0.304	0.0408	0.134	-0.0110	0.0369	0.256	0.266	0.210	0.173	0.159	0.529
$d_7$	0.716	0.128	0.688	-0.231	0.806	0.740	0.766	0.695	0.752	0.866	1.797
$d_8$	0.0238	-1.973	-3.785	0.562	-1.595	2.180	-1.150	-1.534	-2.518	0.753	0.00126
$d_9$	-2.657	9.047	15.708	-3.524	8.573	-9.020	7.512	8.517	9.629	-0.692	-0.411
$d_{10}$	12.147	-16.028	-27.865	8.825	-19.163	14.105	-22.438	-19.132	-16.828	-8.162	1.653
$d_{11}$	-17.963	14.407	29.768	-9.722	22.196	-12.587	30.249	20.854	16.094	16.023	-2.122
$d_{12}$	-0.0730	-3.505	-4.667	0.225	-4.941	-0.281	-5.040	-4.144	-3.875	-7.799	-0.0412
$d_{13}$	-0.00590	-0.302	-0.400	0.0196	-0.451	-0.0267	-0.429	-0.351	-0.336	-0.600	-0.00361

【条文说明】文献“徐玉野，王全凤，罗漪. 混凝土矩形柱的耐火极限分析及实用计算. 华侨大学学报, 2008, 29(2): 284-288”对四面受火的硅质骨料普通混凝土矩形柱进行了大量高温反应分析，在此基础上建立了式 (5.3.4-1) 和式 (5.3.4-2)。由于钙质骨料构件的耐火性能通常优于硅质骨料构件，同时非四面受火时柱的耐火极限一般大于四面受火柱（见文献“吴波，唐贵和，王超. 不同受火方式下混凝土柱耐火性能的试验研究. 土木工程学报, 2007, 40(4): 27-31”），因此针对钙质骨料普通混凝土矩形柱和非四面受火情况采用式 (5.3.4-1) 是偏安全的。

5.3.5 普通混凝土柱的高温承载力可采用常温方法针对缩减后的有效截面进行计算，也可采用附录 A 的高级计算方法进行确定，再根据第 3.3.1 条和第 3.1.3 条

进行普通混凝土柱的耐火设计。

【条文说明】文献“吴波, 徐玉野. 钢筋混凝土 T 形柱的耐火极限研究. 土木工程学报, 2007, 40(3): 32-39”、“吴波, 徐玉野. 钢筋混凝土十字形柱的耐火极限研究. 工程力学, 2008, 25(3): 167-173”和“徐玉野, 吴波. 钢筋混凝土 L 形柱的耐火极限. 华南理工大学学报, 2007, 35(7): 110-115”对四周受火的硅质骨料普通混凝土等肢异形柱进行了大量高温反应分析, 并与足尺试验结果进行了对比, 在此基础上建立了式 (5.3.5-1) 和式 (5.3.5-2)。由于钙质骨料构件的耐火性能通常优于硅质骨料构件, 同时非四周受火时柱的耐火极限一般大于四周受火柱, 因此针对钙质骨料普通混凝土等肢异形柱和非四周受火情况采用式 (5.3.5-1) 是偏安全的。

## 5.4 板

5.4.1 当普通混凝土板的板厚以及纵向受拉钢筋的保护层厚度不小于表 5.4.1 的规定时, 板满足相应的耐火极限要求。

表 5.4.1 板厚和纵向受拉钢筋保护层厚度的最小值

耐火极限 (min)	板厚 (mm)	纵向受拉钢筋的保护层厚度 (mm)		
		单向板	双向板	
			$l_y/l_x \leq 2.0$	$2.0 < l_y/l_x \leq 3.0$
60	80	20	15	15
90	100	25	15	20

注: ①  $l_y$  和  $l_x$  分别为双向板的长跨和短跨, 双向板适合于四边支撑情况, 否则按单向板考虑;

② 纵向受拉钢筋的保护层厚度与钢筋半径之和大于 0.2 倍板厚时, 需计算校核裂缝宽度, 必要时应配置附加钢筋。

【条文说明】板厚最小值取自 Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 第 5.7.2 条。纵向受拉钢筋的保护层厚度最小值则是根据《混凝土结构设计规范》GB 50010 有关钢筋最小保护层厚度的要求, 通过对 Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 第 5.7.2 条的相关数值调整而得。

5.4.2 普通混凝土连续板还应满足下列要求:

1 常温下支座处的负弯矩调幅系数不超过 15%; 若超过, 则连续板的每一跨均应按简支板考虑并符合表 5.4.1 的规定。

2 连续板下部纵向钢筋伸入支座的锚固长度不应小于  $10d$ ,  $d$  为下部纵向钢筋直径。

3 现浇板的上部构造钢筋应满足《混凝土结构设计规范》GB 50010 第 9.1.6

条的规定，同时钢筋伸入板的长度按下列要求增加：

1) 当现浇板的受力钢筋与梁平行时，沿梁长度方向配置与梁垂直的上部构造钢筋伸入板内的长度从梁边算起每边不宜小于板计算跨度的 1/3；

2) 周边与混凝土梁或混凝土墙整体浇筑的单向板或双向板，其上部构造钢筋自梁边或墙边伸入板内的长度，在单向板中不宜小于受力方向板计算跨度的 1/4，在双向板中不宜小于板短跨方向计算跨度的 1/3，且每米板宽中至少有 2 根通长布置；

3) 嵌固在砌体墙内的现浇板，其上部与板边垂直的构造钢筋伸入板内的长度，从墙边算起不宜小于板短边跨度的五分之一；在两边嵌固于墙内的板角部分，双向上部构造钢筋伸入板内的长度从墙边算起不宜小于板短边跨度的 1/3。

【条文说明】1 取自 Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 第 5.7.3 (2) 条。

2 根据国内外火灾试验结果，对《混凝土结构设计规范》GB 50010 第 9.1.4 条规定的锚固长度进行了调整。

3 连续板的火灾试验表明，《混凝土结构设计规范》GB 50010 第 9.1.6 条的规定（即构造钢筋伸入板内的长度从梁边算起每边不宜小于板的计算跨度的 1/4）不合适，结合工程经验将其调整为 1/3。与此同时，对《混凝土结构设计规范》GB 50010 第 9.1.6 条有关延伸入板内的构造钢筋长度也进行了调整，将各类长度适当延长。

**5.4.3** 普通混凝土板的高温承载力可采用常温方法针对缩减后的有效截面进行计算，也可采用附录 A 的高级计算方法进行确定，再根据第 3.1.3 条进行普通混凝土板的耐火设计。

【条文说明】本条根据承载能力极限状态对普通混凝土板进行耐火设计。

## 5.5 墙

**5.5.1** 当普通混凝土墙的墙厚以及纵向受力钢筋的保护层厚度不小于表 5.5.1 的规定时，墙满足相应的耐火极限要求。

表 5.5.1 墙厚和纵向受力钢筋保护层厚度的最小值

耐火极限 (min)	墙厚 (mm) / 纵向受力钢筋的保护层厚度 (mm)			
	$\mu = 0.35$		$\mu = 0.7$	
	单面受火	双面受火	单面受火	双面受火
60	140 / 15	140 / 15	140 / 15	140 / 15
90	140 / 15	140 / 15	140 / 20	170 / 20
120	150 / 20	160 / 20	160 / 30	220 / 30
180	180 / 35	200 / 40	210 / 45	270 / 50

注： $\mu$  为组合轴向压力与该力作用点处墙常温轴向承载力之比。

**【条文说明】**表中数值是参考 Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 第 5.4.2 条，并根据《混凝土结构设计规范》GB 50010 有关混凝土剪力墙最小厚度和纵向受力钢筋最小保护层厚度的要求调整而得。

**5.5.2** 普通混凝土墙的高温承载力可采用常温方法针对缩减后的有效截面进行计算，也可采用附录 A 的高级计算方法进行确定，再根据第 3.3.1 条和第 3.1.3 条进行普通混凝土墙的耐火设计。

**【条文说明】**本条根据承载能力极限状态对普通混凝土墙进行耐火设计。

## 6 特殊混凝土构件

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 高温下特殊混凝土构件的承载力计算可采用常温下普通混凝土构件的计算原则和方法，但钢筋和混凝土的力学性能需依据截面温度场进行相应的修正。构件高温承载力计算过程中，钢筋和混凝土的常温强度采用标准值。

【条文说明】高温下特殊混凝土构件的正截面承载力计算公式，仍可基于平截面假定并根据力及力矩的平衡关系进行建立，这与常温下普通混凝土的处理思路是一致的，但需考虑温度对材料力学性能的影响。由于火灾的发生为小概率事件，计算过程中钢筋和混凝土的常温强度采用标准值是适宜的。

**6.1.2** 高温下特殊混凝土构件的截面可近似以缩减后的有效截面予以等效，有效截面根据附录 C 进行确定。

【条文说明】参考 Eurocode 2 Part 1-2 (BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules—Structural fire design) 和文献“过镇海，时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算. 北京：清华大学出版社，2003”制定本条。

### 6.2 震损混凝土构件

**6.2.1** 震损混凝土柱耐火极限考虑的损伤变量包括保护层脱落厚度、轴压比、残余变形等。对混凝土柱耐火极限的折减系数可按式 (6.2.1) 近似计算：

$$\chi = 0.0261n_c^{1.06} \left( a_z^{1.02} + 13.3\beta_z^{4.11} \right) \quad (6.2.1)$$

式中  $\chi$  —— 震损柱耐火极限折减系数；  
 $n_c$  —— 轴压比 (0.4~0.55)；  
 $a_z$  —— 混凝土剥落厚度 (0~35mm)；  
 $\beta_z$  —— 震后层间位移角 (0~50mm)。

【条文说明】根据震害调查资料以及试验现象统计可知，地震后的钢筋混凝土构件破坏形式可以归纳为：裂缝、混凝土保护层剥落、残余变形三种类型。混凝土保护层剥落厚度在 0~35mm 之间。残余变形取值时参考我国《建筑抗震设计规范》GB50011-2010 所给出了弹塑性层间位移角限值。式 (6.2.1) ~ (6.2.2) 主要出自文献“王鲁哲. 足尺震损钢筋混凝土柱耐火性能试验研究. 西安：西安建筑科技大学硕士学位论文，2018”。

**6.2.2** 震损混凝土柱耐火极限可按式 (6.2.2) 近似计算， $\chi \geq 1$  时表示柱已受到严重破坏近乎丧失承载力，耐火极限为 0。

$$R = (1 - \chi)R_0 \quad (6.2.2)$$

式中  $R$  —— 震损柱耐火极限；  
 $R_0$  —— 完整构件耐火极限。

【条文说明】根据震害调查资料以及试验现象统计可知，地震后的钢筋混凝土构件破坏形式可以归纳为：裂缝、混凝土保护层剥落、残余变形三种类型。混凝土保护层剥落厚度在 0~35mm 之间。残余变形取值时参考我国《建筑抗震设计规范》GB50011-2010 所给出了弹塑性层间位移角限值。式（6.2.1）~（6.2.2）主要出自文献“王鲁哲. 足尺震损钢筋混凝土柱耐火性能试验研究. 西安：西安建筑科技大学硕士学位论文，2018”。

6.2.3 考虑剥落厚度的震损混凝土梁耐火极限折减系数按式（6.2.3-1）~式（6.2.3-3）计算：

$$n_p = A_p + B_p \cdot a \quad (6.2.3-1)$$

$$A_p = -0.12\bar{h}/h + 1.03 \quad (6.2.3-2)$$

$$B_p = -0.99 - 0.003\bar{h}/h + 0.036(\bar{h}/h)^2 \quad (6.2.3-3)$$

式中  $n_p$  —— 震损梁耐火极限折减系数；  
 $A_p$ 、 $B_p$  —— 与相对剥落长度有关的参数；  
 $\bar{h}/h$  —— 混凝土相对剥落长度  
 $a$  —— 混凝土剥落厚度

【条文说明】根据震害调查资料以及试验钢筋混凝土构件的破坏现象统计结果得知，地震后的钢筋混凝土框架梁破坏形式裂缝和混凝土保护层剥落两种类型。式（6.2.3）~（6.2.4）主要出自文献“郭俊杰. 火灾作用下震损钢筋混凝土框架梁高温性能研究. 西安：西安建筑科技大学硕士学位论文，2019”。

6.2.4 考虑跨高比、相对裂缝深度和荷载比影响的震损混凝土梁耐火极限按式（6.2.4）计算：

$$R = 14.27n_b^{-1.02} \left[ 3.02(d/h)^{-2.6} + 2.12N^{-3.5} \right] \quad (6.2.4)$$

式中  $R$  —— 震损梁耐火极限；  
 $n_b$  —— 跨高比（6.67~10）；  
 $d/h$  —— 相对裂缝深度（0~0.35）；  
 $N$  —— 荷载比（0~0.35）。

【条文说明】根据震害调查资料以及试验钢筋混凝土构件的破坏现象统计结果得知，地震后的钢筋混凝土框架梁破坏形式裂缝和混凝土保护层剥落两种类型。式（6.2.3）~（6.2.4）主要出自文献“郭俊杰. 火灾作用下震损钢筋混凝土框架梁高温性能研究. 西安：西安建筑科技大学硕士学位论文，2019”。

### 6.3 煤矸石混凝土构件

6.3.1 煤矸石混凝土简支梁的耐火极限可按式 (6.3.1) 近似计算:

$$t_m = (0.65r_c^2 - 0.76r_c + 0.99) \frac{0.13c + 16.04}{1.94 \left( \frac{M}{M_u} \right)^2 - 1.62 \frac{M}{M_u} + 0.45} \quad (6.3.1)$$

式中  $t_m$  —— 耐火极限 (min) ;  
 $r_c$  —— 煤矸石骨料取代率;

【条文说明】西安建筑科技大学进行了 5 根煤矸石凝土简支梁的耐火试验, 同时基于式 (3.2.1) 的标准火灾升温曲线, 对不同取代率下的煤矸石混凝土简支梁的耐火极限进行了计算分析。结合试验和数值分析结果, 制定了式 (6.3.1)。

6.3.2 煤矸石混凝土矩形柱的耐火极限可按式 (6.3.2-1) ~ 式 (6.3.2-3) 近似计算:

$$t_c = [0.05 \times k_{cp} \times k_{ec} \times (126 - (S_R + 9)(N + 1.24))]^{1.7} \quad (6.3.2-1)$$

$$k_{cp} = \frac{[(c - 82) \times (\rho + 10.5) + 700]}{390} \quad (6.3.2-2)$$

$$k_{ec} = \frac{[(S_R - 243) \times (E_c - 768) - 83250]}{99880} \quad (6.3.2-3)$$

式中  $t_c$  —— 煤矸石混凝土柱耐火极限 (min) ;  
 $S_R$  —— 长细比;  
 $N$  —— 荷载比;  
 $k_{ec}$  —— 与煤矸石混凝土受火柱长细比及偏心距有关的常数;  
 $E_c$  —— 偏心距。

【条文说明】文献“高冠一. 煤矸石混凝土高温性能及结构耐火性能研究. 西安: 西安建筑科技大学博士学位论文, 2025”。基于煤矸石混凝土热工参数采用顺序耦合的有限元分析方法进行方形柱耐火极限分析, 确定了式 (6.3.2)。

6.3.3 煤矸石混凝土矩形柱的剩余承载力折减系数可按式 (6.3.3-1) ~ 式 (6.3.3-5) 近似计算:

$$\alpha_c = 0.24R(r) \cdot T(t) \cdot R(b) \cdot C(c) \quad (6.3.3-1)$$

$$R(r) = 1 + 3.46 \times 10^{-3} r \quad 0 \leq r \leq 100 \quad (6.3.3-2)$$

$$T(t) = -0.0175t + 4.93 \times 10^{-5} + 2.18 \quad 90 \leq t \leq 180 \quad (6.3.3-3)$$

$$R(b) = 2.7 \times 10^{-3} b + 0.334 \quad 250 \leq b \leq 350 \quad (6.3.3-4)$$

$$C(c) = 0.0174c + 0.65 \quad 20 \leq c \leq 25 \quad (6.3.3-5)$$

式中  $\alpha_c$  —— 剩余承载力折减系数;

- $R(r)$  —— 煤矸石取代率对剩余承载力折减系数的影响；
- $T(t)$  —— 受火时间对剩余承载力折减系数的影响；
- $R(b)$  —— 截面尺寸对剩余承载力折减系数的影响， $b$  取柱短边尺寸；
- $C(c)$  —— 保护层厚度对剩余承载力折减系数的影响。

【条文说明】西安建筑科技大学进行了 2 根煤矸石混凝土受压短柱的耐火试验，同时基于式 (3.2.1) 的标准火灾升温曲线，对不同取代率下的煤矸石混凝土短柱的受压承载力进行了计算分析。结合试验和数值分析结果，制定了式(6.3.3)。参考文献“李亚东. 高温后煤矸石混凝土柱轴压性能研究. 西安：西安建筑科技大学硕士学位论文，2024”。

## 6.4 废玻璃混凝土构件

6.4.1 废玻璃取代率对混凝土矩形柱的剩余承载力折减系数可按式 (6.4.1) 近似计算：

$$\alpha_c = 0.636 - 7.78 \times 10^{-4} r_{GS} + 5.54 \times 10^{-6} r_{GS}^2 \quad (6.4.1)$$

式中  $\alpha_c$  —— 剩余承载力折减系数；

【条文说明】西安建筑科技大学进行了 4 根废玻璃混凝土受压短柱的耐火试验，同时基于式 (3.2.1) 的标准火灾升温曲线，对不同取代率下的废玻璃混凝土短柱的受压承载力进行了计算分析。结合试验和数值分析结果，制定了式(6.4.1)。

## 7 既有钢筋混凝土结构耐火性能提升

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 当既有钢筋混凝土结构的耐火性能不满足本标准第 5 章、第 6 章规定时，可采用本章规定的方法进行耐火性能提升。本章规定不适用于高温熔融、爆炸冲击等极端火灾作用下已完全破坏的结构。

【条文说明】本条明确既有钢筋混凝土结构耐火性能提升的适用前提，即当结构现状不能满足规范规定的耐火极限或防火性能要求时，应采取补强或防护措施予以提升。同时强调，本章方法主要针对结构尚具承载能力的情形，对于经历高温熔融、爆炸冲击等极端火灾作用后已发生整体或不可逆破坏的结构，应进行拆除或重建处理，而非简单防火加固。

**7.1.2** 既有钢筋混凝土结构防火性能的提升应以表面施加额外防护涂层为主，具体措施包括喷涂防火涂料、包裹防火板材、粘贴复合防护系统等。

【条文说明】本条提出以“表面附加防护”为主的技术路线。这是因为既有结构内部改造难度大、成本高，而表面防护层可有效延缓热量传递，提高构件耐火极限。喷涂防火涂料、包裹防火板材及复合防护系统均为工程中成熟、可操作性强的措施，能够兼顾施工便利性与耐火性能提升效果。

### 7.2 防火涂料

**7.2.1** 本节适用于工业与民用建筑中钢筋混凝土结构（包括梁、柱、板、墙、基础等构件）所用防火涂料的选型、进场检验及施工。不适用于高温、高湿、强腐蚀、强振动等特殊环境下的钢筋混凝土结构防火保护，特殊环境应符合相关专项规范要求。

【条文说明】本条规定了防火涂料的适用范围，主要针对常规工业与民用建筑环境。对于高温、高湿、强腐蚀或强振动等特殊环境，普通防火涂料的耐久性与附着性能可能无法满足要求，应依据专项规范进行设计。

**7.2.2** 钢筋混凝土结构防火涂料的选型应根据保护部位、火灾类型及设计耐火极限要求确定。

【条文说明】防火涂料的选型需综合考虑构件类型（梁、柱、板等）、受火形式（标准升温或特殊火灾）及设计耐火极限。不同构件的受力状态和热响应差异较大，合理选型是确保防护效果的关键。参考《混凝土结构防火涂料》GB 28375-2025 第 4 章、《建筑设计防火规范》GB 50016-2025 第 5.1.2 条。

**7.2.3** 防火涂料的耐火性能应按火灾升温曲线分为建筑纤维类（Fp）、烃类（Ft）、石油化工类（Fs）、RABT 类（Fb）四级，耐火极限应涵盖 0.50h、1.00h、1.50h、

2.00h 等多个等级，选型应满足对应构件的设计耐火极限要求，且不应低于规范规定的最低限值。

**【条文说明】**本条依据火灾类型对防火涂料耐火性能进行分类，有助于与不同工程场景（如建筑火灾、隧道火灾、石化火灾等）相匹配。耐火极限分级的设置（0.50h~2.00h 及以上）为设计提供了明确依据，确保防护层性能不低于结构设计要求。参考《混凝土结构防火涂料》GB 28375-2025 第 4.2 条 耐火性能分级。

**7.2.4** 防火涂料不应掺加石棉等对人体有害的物质，实干后无刺激性气味，可采用喷涂、抹涂、刮涂等方法施工，能在自然环境下干燥固化。

**【条文说明】**本条强调防火涂料的安全性与施工适应性要求。禁止使用石棉等有害物质，旨在保障施工及使用阶段的人员健康；同时规定施工方式及自然固化条件，以适应现场施工环境。参考《混凝土结构防火涂料》GB 28375-2025 第 5 章 一般要求。

**7.2.5** 混凝土结构防火涂料（室内/室外）的理化性能应符合以下要求：表干时间 $\leq 24\text{h}$ ，黏结强度（冻融前/后） $\geq 0.15\text{MPa}$ ，抗压强度（冻融前/后） $\geq 1.50\text{MPa}$ ，干密度 $\leq 700\text{kg/m}^3$ ，耐酸、耐碱时间 $\geq 360\text{h}$ ，耐湿热时间 $\geq 720\text{h}$ ，耐冻融循环 $\geq 15$  次；室外型还应满足耐曝热 $\geq 720\text{h}$ 、耐盐雾腐蚀 $\geq 30$  次、耐紫外线辐照 $\geq 60$  次；室内型产烟毒性应不低于 GB/T 20285-2006 中 ZA1 级。

**【条文说明】**本条对防火涂料的理化性能提出定量指标，是保证其长期服役性能的关键。包括粘结强度、抗压强度、耐久性（耐酸碱、湿热、冻融等）及环境适应性等指标。其中室外型涂料需额外满足耐候性要求，室内型则需关注烟气毒性，体现安全与环保要求。参考《混凝土结构防火涂料》GB 28375-2025 第 6 章 性能要求。

**7.2.6** 钢筋混凝土结构防火涂料的选用、施工及验收，除应符合本节规定外，还应符合现行国家、行业相关标准规范的要求。

**【条文说明】**本条为通用性条款，强调在实际工程中除本节规定外，还应满足现行相关标准规范要求，以确保设计、施工与验收的完整性与合规性。

## 7.3 防火板材

**7.3.1** 本节适用于工业与民用建筑中钢筋混凝土结构（包括梁、柱、板、墙、基础等构件）所用防火板材的选型、进场检验及施工。不适用于高温、高湿、强腐蚀、强振动等特殊环境下的钢筋混凝土结构防火保护，特殊环境应符合相关专项规范要求。

**【条文说明】**本条明确防火板材的适用范围，与防火涂料类似，主要针对一般环境条件。特殊环境需采用专门设计的防护体系。

**7.3.2** 钢筋混凝土结构包裹用防火板材，应根据构件类型、设计耐火极限、使用环境（室内/室外）及安装场景，选用不燃性（A级）防火板材，严禁选用可燃、难燃类板材作为主力防火包裹材料；常用防火板材可选用纤维增强低碱度水泥平板、硅酸钙防火板、阻燃石膏板等，选型应经设计验算确认。

【条文说明】本条强调防火板材必须采用A级不燃材料，这是保证耐火性能的基本前提。列举的常用板材类型（如硅酸钙板、纤维水泥板等）具有良好的耐火性与工程适用性。选型需通过结构与热工验算确定，以确保整体防护效果。参考《建筑钢结构防火技术规范》GB51249-2017第7章 钢结构耐火验算与防火保护设计、《不燃无机复合板》GB/T 25970-2010第1章 范围、《建筑内部装修设计防火规范》GB 50222-2017第3.0.2~3.0.4条。

**7.3.3** 防火板材的耐火极限应与钢筋混凝土构件的设计耐火极限相匹配，且不应低于构件设计耐火极限要求，常用耐火极限等级应涵盖0.50h、1.00h、1.50h、2.00h、3.00h，其中承重构件（梁、柱）包裹用板材耐火极限不应低于1.50h。

【条文说明】本条规定防火板材耐火极限应与构件设计耐火极限相匹配，防止出现“防护不足”的情况。对于承重构件提出更高要求（不低于1.50h），体现其在火灾中的关键安全作用。参考《建筑钢结构防火技术规范》GB51249-2017第3.1.2条、第3.1.3条，《建筑设计防火规范》GB 50016-2025第5.1.2条。

**7.3.4** 室内环境选用的防火板材，应符合环保要求，无刺激性气味；室外环境选用的防火板材，还应具备耐曝热、耐湿热、耐紫外线辐照、耐盐雾腐蚀性能，满足长期户外使用要求。防火板材的规格尺寸应结合构件截面尺寸、施工工艺确定，板材厚度应根据耐火极限要求验算确定，且应满足抗弯强度、剥离强度等力学性能要求。

【条文说明】本条从环保性与耐久性两方面提出要求。室内环境重点控制有害物质释放，室外环境则强调抗气候作用能力。此外，板材尺寸与厚度需结合构件尺寸及施工工艺合理确定，并满足必要的力学性能。参考GB 50325-2020《民用建筑工程室内环境污染控制标准》第3章 材料、《钢结构防火保护板》XF/T 3012-2020第5.11条。

**7.3.5** 防火板材的燃烧性能应符合A级不燃要求，其不燃性应满足GB/T 5464规定。

【条文说明】本条进一步明确防火板材燃烧性能必须达到A级不燃标准，是对材料防火性能的强制性要求。

**7.3.6** 防火板材的理化性能应符合下列要求：1. 剥离强度：幕墙用 $\geq 110\text{N}\cdot\text{mm}/\text{mm}$ ；2. 含水率：阻燃石膏板 $\leq 12\%$ ，其他板材 $\leq 8\%$ ；3. 耐冻融循环 $\geq 15$ 次，冻融后无开裂、脱层、掉粉现象；4. 耐酸、耐碱时间 $\geq 360\text{h}$ ，无明显腐蚀、变色。

【条文说明】本条对板材的理化性能提出具体指标，如剥离强度、含水率及耐久性能等，这些指标直接关系到板材在长期服役中的稳定性与安全性。参考《钢结构防火保护板》XF/T 3012-2020 第 5.11 条。

**7.3.7 防火板材配套材料**（龙骨、连接件、密封胶等）的防火性能应与板材匹配，龙骨应采用镀锌钢材或不燃材料制作，密封胶应采用防火密封胶，燃烧性能不应低于 B1 级，且应具备耐高温、粘结牢固的特性。

【条文说明】本条强调配套材料的重要性。龙骨、连接件及密封胶等若防火性能不足，将削弱整体防护效果，因此要求其性能与板材匹配，并具备必要的耐高温与粘结性能。参考 GB 51249-2017《建筑钢结构防火技术规范》第 4.1.4 条，GB 50222-2017《建筑内部装修设计防火规范》第 3.2.6 条。

**7.3.8 钢筋混凝土结构防火板材的选用、施工及验收**，除应符合本规定外，还应符合现行国家、行业相关标准和规范的要求。

【条文说明】本条为补充性规定，强调防火板材系统在设计、施工及验收过程中应符合相关规范的整体要求。

## 7.4 复合防护系统

**7.4.1** 本节适用于工业与民用建筑中钢筋混凝土结构（包括梁、柱、板、墙、基础等构件）所用复合防护系统的选型、进场检验及施工。不适用于高温、高湿、强腐蚀、强振动等特殊环境下的钢筋混凝土结构防火保护，特殊环境应符合相关专项规范要求。

【条文说明】本条明确复合防护系统的适用范围，其基本条件与前述防护措施一致，主要用于常规环境下的结构防火与耐久性提升。

**7.4.2 复合防护系统**：采用专用胶粘剂，将两种及以上防护材料（如纤维复合材料、钢板、防火涂料、防腐层等）依次粘贴于钢筋混凝土构件表面，形成兼具防护（防火、防腐、抗老化等）功能的复合防护体系。

【条文说明】本条对复合防护系统进行定义，强调其“多层、多功能”的特点。通过不同材料组合，可同时实现防火、防腐及抗老化等多重功能，适用于复杂工程需求。参考 GB 50367-2013《混凝土结构加固设计规范》第 10.1.4 条、10.1.7 条，GB 50608-2020《纤维增强复合材料工程应用技术标准》第 4.4.1 条、4.4.2 条。

**7.4.3 专用胶粘剂**：用于粘贴防护材料与钢筋混凝土构件、防护材料之间的专用粘结材料，应具备良好的粘结强度、耐久性、相容性及与防护材料、混凝土的协同变形能力。

【条文说明】专用胶粘剂是复合防护系统的关键材料，其性能直接影响体系整体可靠性。本条强调其粘结强度、耐久性及相容性要求，以确保各层材料协同

工作。参考 GB 50367-2013《混凝土结构加固设计规范》第 4.4.1 条~4.4.3 条，GB 50608-2020《纤维增强复合材料工程应用技术标准》第 4.1.2 条，GB 50728-2011《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》附录 G。

**7.4.4 基层：**钢筋混凝土构件表面经过清理、修整后，用于粘贴防护材料的混凝土表面。

**【条文说明】**基层处理是保证粘结效果的前提。本条明确基层应经过清理与修整，以提高界面粘结性能，避免因界面缺陷导致防护层脱落。参考 GB 50367-2013《混凝土结构加固设计规范》第 10.1.4 条,GB 50550-2010《建筑结构加固工程施工质量验收规范》第 5.2.1 条。

**7.4.5 防护层：**复合防护系统中承担具体防护功能（防火、防腐、抗老化等）的各层材料，包括底层粘结层、中间防护层、面层防护层。

**【条文说明】**本条对防护层构成进行说明，明确不同层次的功能分工，有助于设计人员合理配置材料体系。参考 GB 50367-2013《混凝土结构加固设计规范》第 10.1.4 条，GB 50608-2020《纤维增强复合材料工程应用技术标准》第 4.4.1 条、第 2.1.16 条。

**7.4.6 防火防护材料（防火涂料、防火砂浆等）的耐火极限应符合设计要求及《建筑设计防火规范》GB 50016-2018 的规定，采用水泥砂浆作为防火防护层时，应加钢丝网防裂。**

**【条文说明】**本条规定防火防护材料的耐火极限应满足设计及规范要求，并针对水泥砂浆防护层提出设置钢丝网的措施，以防止开裂并提高整体稳定性。参考 GB 50702-2011《砌体结构加固设计规范》第 10.1.5 条。

**7.4.7 钢筋混凝土结构复合防护系统的选用、施工及验收，除应符合本规定外，还应符合现行国家、行业相关标准和规范的要求。**

**【条文说明】**本条为综合性规定，强调复合防护系统在选用、施工及验收过程中应遵循现行标准规范，确保工程质量与安全性。

## 附录 A 高级计算方法

对于第 3.1.3 条规定的建筑结构，在进行整体火灾分析时需考虑室内火灾的实际升温曲线、高温下材料性能的逐渐劣化，以及构件热变形和相邻构件之间相互约束的影响。

高温下钢筋和混凝土的材料特性与常温时相差很大，最显著的区别是其本构模型与温度和时间参数有关，除应力引起的应变以外，还有热膨胀应变、钢筋的高温瞬时蠕变、混凝土的瞬态热应变和短期高温徐变。随着温度的升高，钢筋和混凝土的导热系数、比热容、密度等热工参数以及热膨胀系数也不断变化。

为了全面把握混凝土构件和结构的高温行为，可以对其进行火灾条件下的非线性全过程分析。目前，通常采用大型通用程序首先对混凝土构件和结构的时变内部温度场进行计算，然后在此基础上考虑材料高温性能的时变特性，开展构件和结构的高温力学分析，进而获得构件和结构的高温承载力随升温时间的变化情况，再根据第 3.1.2 条判断构件或结构的耐火设计是否满足要求。

## 附录 B 室内火灾的空气温度

室内火灾的空气温度可按如下模型进行计算：

$$\frac{T_g - T_{g0}}{T_{gm} - T_{g0}} = \left[ \frac{t}{t_m} \exp\left(1 - \frac{t}{t_m}\right) \right]^B \quad (\text{B-1})$$

式中  $T_g$ ——火灾发生后对应  $t$  时刻的室内空气温度 (°C)；

$T_{g0}$ ——火灾发生前的室内空气温度 (°C)；

$T_{gm}$ ——火灾发生后室内空气的最高温度 (°C)；

$t_m$ —— $T_{gm}$  对应的时刻 (min)；

$B$ ——模型参数， $t \leq t_m$  时  $B=0.8$ ，反之则  $B=1.6$ 。

对于通风控制型火灾（当  $A_w \sqrt{h} / A_f < 0.07$  时），最高温度  $T_{gm}$  可按式 (B-2)

计算：

$$T_{gm} = 1240 - 13.3\eta \quad (\text{B-2})$$

式中  $\eta$ —— $\eta = A_f / (A_w \sqrt{h})$  为开口因子。其中  $A_w$  和  $h$  分别为室内垂直开口的面积 (m<sup>2</sup>) 和开口上、下边缘之间的高度差 (m)；

$A_f$ ——燃料的表面积 (m<sup>2</sup>)；

$A_t$ ——由墙和顶棚（不包括开口）组成的散热表面积 (m<sup>2</sup>)。

对于燃料表面控制型火灾（当  $A_w \sqrt{h} / A_f \geq 0.07$  时），最高温度  $T_{gm}$  可按式 (B-3)

计算：

$$T_{gm} / T_{gmcr} = (\eta / \eta_{cr})^{0.5} \quad (\text{B-3})$$

式中  $\eta_{cr}$ —— $\eta_{cr} = 14.34 A_t / A_f$ ；

$T_{gmcr}$ ——由  $\eta_{cr}$  代入式 (B-2) 求得。

最高温度  $T_{gm}$  对应的时刻  $t_m$  可按式 (B-4) 计算：

$$t_m = 0.63 t_f \quad (\text{B-4})$$

式中  $t_f$ ——全盛期火灾持时 (min)，由式 (B-5) 或式 (B-6) 确定。

$$\text{对于通风控制型火灾：} \quad t_f = 0.175 M_0 / (A_w \sqrt{h}) \quad (\text{B-5})$$

$$\text{对于燃料表面控制型火灾：} \quad t_f = 2.52 M_0 / A_f \quad (\text{B-6})$$

式中  $M_0$ —— $M_0 = \sum M_i H_i / H_*$  为室内可燃材料根据发热量等效原则折合而成的当量木材的总质量 (kg)，其中  $H_*$  为木材的单位发热量 (MJ/kg)， $M_i$  和  $H_i$  分别为

第  $i$  种可燃材料的质量 (kg) 和单位发热量 (MJ/kg),  $H_i$  按表 A-1 确定;

$A_f$ —— $A_f = \varphi M_0$ , 其中  $\varphi$  为燃料的比表面积 ( $\text{m}^2/\text{kg}$ ), 一般家具  $0.1 < \varphi < 0.4 \text{ m}^2/\text{kg}$ , 最常见为  $0.12 \sim 0.18 \text{ m}^2/\text{kg}$  之间。

室内当量木材的总质量  $M_0$  也可按式 (B-7) 估计:

$$M_0 = \frac{q_0 A_{\text{floor}}}{H_{\text{木}}} \quad (\text{B-7})$$

式中  $q_0$ ——根据建筑物使用功能确定的火灾荷载密度 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ), 按表 B-2 取值;

$A_{\text{floor}}$ ——受火房间的地板面积 ( $\text{m}^2$ )。

表 B-1 可燃材料的单位发热量  $H_i$

材料名称	$H_i$ (MJ/kg)	材料名称	$H_i$ (MJ/kg)	材料名称	$H_i$ (MJ/kg)
无烟煤	34	橡胶轮胎	32	聚苯乙烯	40
石油沥青	41	丝绸	19	石油	41
纸及制品	17	稻草	16	泡沫塑料	25
炭	35	木材	19	聚碳酸酯	29
衣服	19	羊毛	23	聚丙烯	43
煤、焦炭	31	合成板	18	聚氨酯	23
软木	19	ABS	36	聚氯乙烯	17
棉花	18	聚丙烯	28	甲醛树脂	15
谷物	17	赛璐璐	19	汽油	44
油脂	41	环氧树脂	34	柴油	41
厨房废料	18	三聚氰胺树脂	18	亚麻籽油	39
皮革	19	苯酚甲醛	29	煤油	41
油毡	20	聚酯	31	焦油	38
泡沫橡胶	37	聚酯纤维	21	苯	40
异戊二烯橡胶	45	聚乙烯	44	甲醇	33
石蜡	47	甲醛泡沫塑料	14	乙醇	27

表 B-2 火灾荷载密度  $q_0$

建筑使用功能	火灾荷载密度 $q_0$ ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )
住宅、公寓	1100
一般办公室	750
医院病房	550
旅馆住室	750
会议室、讲堂、观众席	650
设计室	2200
教室	550
图书室 (设书架)	4600

商场	1300
----	------

- 注：1 各类仓库（包括商场等建筑物的中转库、书库）的火灾荷载密度应按实际用途进行估计。
- 2 表 B-2 中只包括使用可燃物，不包括装修可燃物和可燃建筑构件。当存在后两者时，应按其实际质量并结合表 B-1 以  $\Sigma M_i H_i / H_{木}$  的方式增加当量木材的质量。

## 附录 C 简化计算方法

### C.1 500℃等温线法

#### C.1.1 基本原理和适用范围

1 本方法适用于标准升温条件（即空气温度遵循标准火灾升温曲线），或与标准升温条件产生的构件温度场相似的其它升温条件。当不符合这一原则时，需根据构件截面温度场并考虑混凝土和钢筋的高温强度进行综合分析。

2 本方法适用于构件截面宽度大于表 C-1 中最小截面宽度的情况。对于标准升温条件，最小截面宽度取决于构件的耐火极限；对于其它升温条件（例如式 (B-1)），最小截面宽度取决于火灾荷载密度。

表 C-1 最小截面宽度

最小截面宽度取决于构件耐火极限				
耐火极限 (min)	60	90	120	180
最小截面宽度 (mm)	90	120	160	200
最小截面宽度取决于火灾荷载密度				
火灾荷载密度 (MJ/m <sup>2</sup> )	200	300	400	600
最小截面宽度 (mm)	100	140	160	200

3 简化计算方法采用缩减的构件截面尺寸，即忽略构件表面的损伤层。损伤层厚度  $a_{z,500}$  取为截面受压区 500℃等温线上各点距离截面边缘的平均深度。假设温度大于 500℃的混凝土对构件承载力没有贡献，而温度不大于 500℃的混凝土的抗压强度和弹性模量采用常温取值，其中常温抗压强度采用标准值。

#### C.1.2 压弯截面的设计步骤

在上述缩减截面方法的基础上，高温下混凝土截面的承载力计算可采用下述步骤：

1 确定截面 500℃等温线的位置；

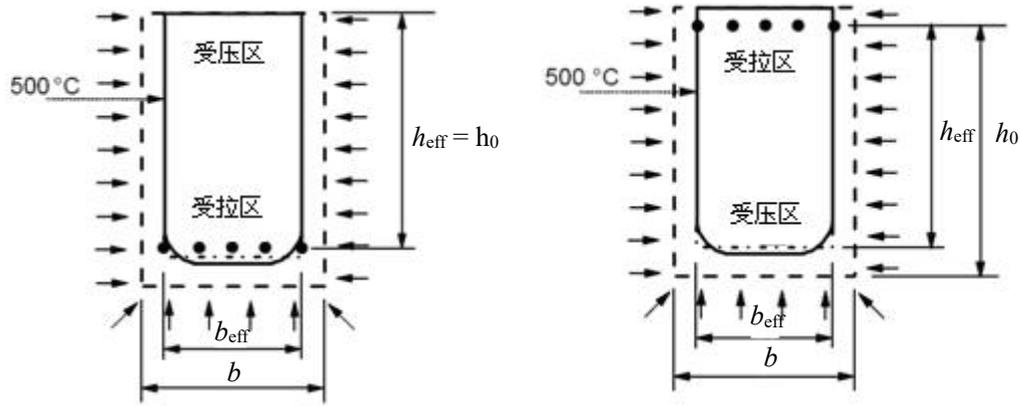
2 去掉截面上温度大于 500℃的部分，得到截面的有效宽度  $b_{\text{eff}}$  和有效高度  $h_{\text{eff}}$ （图 C-1）。等温线的圆角部分可近似处理成直角。

3 确定受拉区和受压区钢筋的温度。单根钢筋的温度可根据钢筋中心处位置由《建筑混凝土结构耐火设计技术规程》（DBJ\_T 15-81-2022）给出的构件截面温度场曲线获得。对于落在缩减后的有效截面之外的部分钢筋（图 C-1），在计算该截面的高温承载力时仍需予以考虑。

4 根据钢筋的温度以及式 (4.1.3) 确定钢筋强度，确定过程中钢筋的常温强度采用标准值。

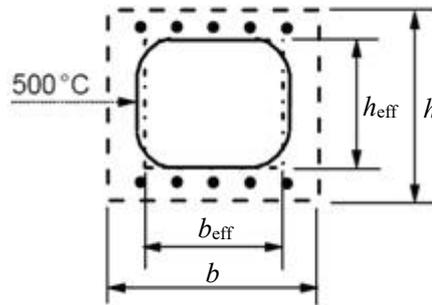
5 针对缩减后的有效截面以及由步骤 4 获得的钢筋强度，采用常温计算方法确定截面的高温承载力。

6 比较并判断截面的高温承载力是否大于相应的作用效应组合。



(a) 三面受火，其中一个受火面为受拉区

(b) 三面受火，其中一个受火面为受压区



(c) 四面受火

图 B-1 混凝土梁和柱缩减后的有效截面

**C.1.3** 若截面钢筋分层布置且各钢筋直径相等，可采用下述方法确定受拉区和受压区钢筋中心至缩减后的有效截面受拉区边缘和受压区边缘的距离  $a_s$  和  $a'_s$ ：

$$a_s = \frac{\sum a_{sj} \overline{f_{yj}}(T)}{\sum \overline{f_{yj}}(T)} \quad (C-1)$$

$$a'_s = \frac{\sum a'_{sj} \overline{f'_{yj}}(T)}{\sum \overline{f'_{yj}}(T)} \quad (C-2)$$

式中  $a_{sj}, a'_{sj}$  —— 分别为受拉区和受压区第  $j$  层钢筋中心至缩减后的有效截面受拉边缘和受压边缘的距离；

$\overline{f_{yj}}(T), \overline{f'_{yj}}(T)$  —— 分别为第  $j$  层钢筋的平均高温抗拉强度和抗压强度，采用式 (C-3)、式 (C-4) 计算：

$$\overline{f_{yj}}(T) = \frac{\sum f_{yj}(T_i)}{n_j} \quad (C-3)$$

$$\overline{f'_{yj}}(T) = \frac{\sum f'_{yj}(T_i)}{n_j} \quad (C-4)$$

$f_{yj}(T_i)$ ,  $f'_{yj}(T_i)$  —— 分别为温度  $T_i$  时第  $j$  层第  $i$  根钢筋的抗拉强度和抗压强度；

$n_j$  —— 第  $j$  层钢筋的根数。

若截面钢筋非分层布置且各钢筋直径不等，可采用下述方法确定受拉区和受压区钢筋中心至缩减后的有效截面受拉区边缘和受压区边缘的距离  $a_s$  和  $a'_s$ ：

$$a_s = \frac{\sum a_{si} f_{yj}(T_i) A_{si}}{\sum f_{yj}(T_i) A_{si}} \quad (C-5)$$

$$a'_s = \frac{\sum a'_{si} f'_{yj}(T_i) A'_{si}}{\sum f'_{yj}(T_i) A'_{si}} \quad (C-6)$$

式中  $A_{si}$ ,  $A'_{si}$  —— 分别为受拉区和受压区第  $i$  根钢筋的横截面积；

$a_{si}$ ,  $a'_{si}$  —— 分别为受拉区和受压区第  $i$  根钢筋至缩减后的有效截面受拉边缘和受压边缘的距离。

### C.2 300℃和 800℃等温线法

高温下普通混凝土构件缩减后的有效截面也可采用下述步骤获得：①确定构件截面上的 300℃和 800℃等温线；②将 300℃和 800℃等温线近似化整为矩形；③保留 300℃等温线以内的全部面积，忽略 800℃等温线以外的全部面积，300℃和 800℃等温线之间的部分宽度减半。图 C-2 分别举例给出了构件三面受火和四面受火时，根据上述步骤获得的有效截面。图中  $b_{300}$  和  $h_{300}$  分别为与 300℃等温线对应的近似矩形的宽度和高度， $b_{800}$  和  $h_{800}$  分别为与 800℃等温线对应的近似矩形的宽度和高度， $b_{T1}=b_{300}+0.5(b_{800}-b_{300})$ ， $b_{T2}=0.5b_{800}$ 。

有效截面内混凝土的抗压强度和弹性模量采用常温取值，有效截面之外的钢筋在构件高温承载力计算时仍需予以考虑，钢筋强度按所在位置处的温度由式 (4.1.3) 逐一确定。在此基础上，采用常温计算方法确定截面的高温承载力。

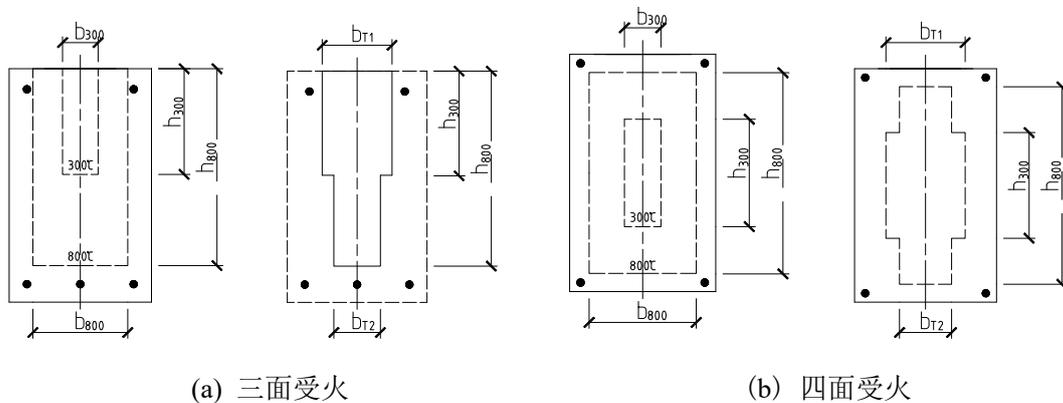


图 C-2 有效截面的确定

### C.3 条带法

**C.3.1** 本方法仅适用于标准升温条件（即空气温度遵循标准火灾升温曲线）。本方法比  $500^{\circ}\text{C}$  等温线法更准确，尤其是对于柱子的承载力计算。

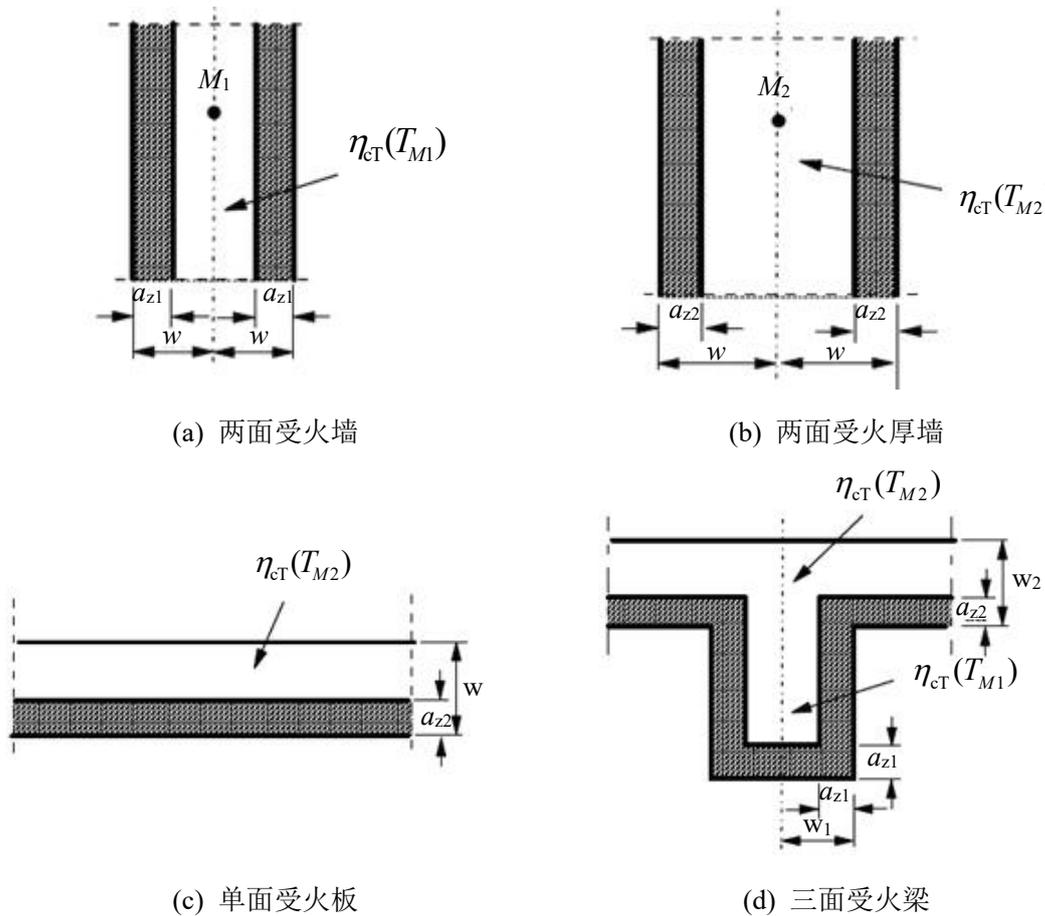
**C.3.2** 高温下混凝土构件截面采用缩减后的有效截面代替，忽略构件受火面损伤层厚度  $a_{z1}$  或  $a_{z2}$  以外的部分（即图 C-3 中的阴影区域）。

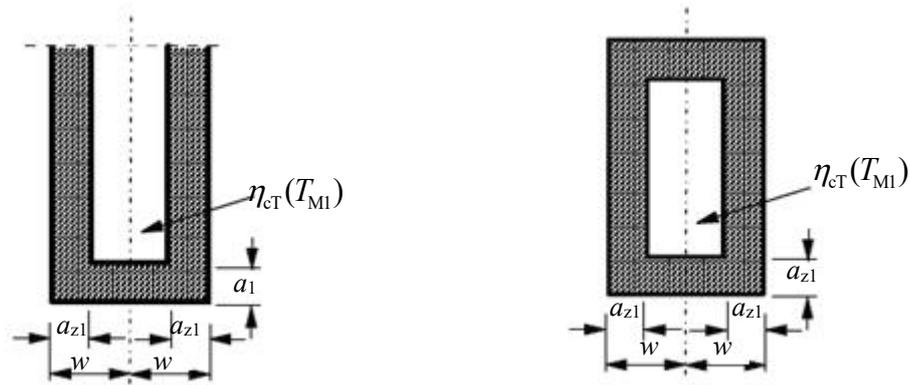
以厚度为  $2w$  的相对两面受火墙为基本构件，图 C-3 (a) 和 C-3 (b) 为基本参考图形。

对于图 C-3 (c) 所示厚度为  $w$  的单面受火板，其受火面的损伤层厚度可近似取厚度为  $2w$  的相对两面受火厚墙（见图 C-3 (b)）的损伤层厚度  $a_{z2}$ 。

对于图 C-3 (d) 所示三面受火梁的腹板和翼缘部分，其受火面的损伤层厚度可分别采用图 C-3 (a) 和 C-3 (b) 对应的损伤层厚度  $a_{z1}$  和  $a_{z2}$ 。

对于截面宽度小于截面高度的矩形构件，底部或端部受火面的损伤层厚度可假设与侧向受火面的损伤层厚度  $a_{z1}$  一致，见图 C-3 (d)、C-3 (e)、C-3 (f)。





(e) 三面受火的墙端

(f) 四面受火柱

图 C-3 受火面的损伤层厚度和缩减后的有效截面

**C.3.3** 相对两面受火墙的受火面损伤层厚度可用下列方法进行估算：

1 在厚度方向上将墙平分为两半，每一半划分成  $n$  个 ( $n \geq 3$ ) 等宽条带 (图 C-4)， $M$  点为平分线上任意一点。

2 确定每个条带中线上的温度以及相应的混凝土抗压强度折减系数。对于普通混凝土和高强混凝土，可分别利用式 (4.4.3) 和式 (4.5.2) 计算条带中线上的混凝土抗压强度折减系数  $\eta_{cT}(T_i)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )。

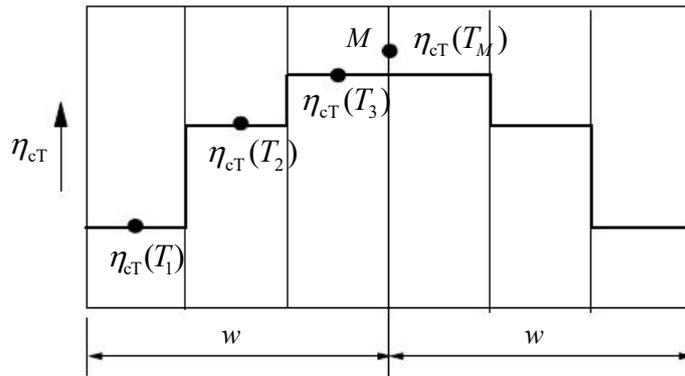


图 C-4 两面受火墙的条带划分

3 采用下式计算混凝土的平均抗压强度折减系数  $\overline{\eta_{cT}}$ ：

$$\overline{\eta_{cT}} = \frac{(1-0.2/n)}{n} \sum_{i=1}^n \eta_{cT}(T_i) \quad (C-7)$$

式中  $n$  —— 在  $w$  范围内划分的条带数；  
 $w$  —— 两面受火墙的 1/2 厚度，对于其它构件分别代表板的厚度、单面受火墙或柱的厚度、梁的 1/2 截面宽度、相对两面受火柱的 1/2 厚度、三面受火或四面受火柱的 1/2 截面宽度。

4 图 C-3 (a) 所示两面受火墙的损伤层厚度  $a_{z1}$  (适用于墙、柱及梁腹板) 采用下式确定：

$$a_{z1} = w \left[ 1 - \left( \frac{\overline{\eta_{cT}}}{\eta_{cT}(T_{M1})} \right)^{1.3} \right] \quad (C-8)$$

式中  $\overline{\eta_{cT}(T_{M1})}$  —— 图 B-4 中  $M$  点的混凝土抗压强度折减系数。

图 C-3 (b) 所示两面受火厚墙的损伤层厚度  $a_{z2}$  (适用于板及梁翼缘) 采用下式确定:

$$a_{z2} = w \left[ 1 - \frac{\overline{\eta_{cT}}}{\eta_{cT}(T_{M2})} \right] \quad (C-9)$$

**C.3.4** 忽略损伤层厚度  $a_z$  以外的部分, 剩下的截面即为高温下构件缩减后的有效截面。假定有效截面内各点的混凝土抗压强度相等, 且均等于平分线上  $M$  点 (图 C-3) 的混凝土抗压强度, 采用常温下的承载力计算方法即可确定该有效截面的高温承载力。计算过程中, 有效截面之外的部分钢筋仍需予以考虑。钢筋的常温强度以及  $M$  点混凝土的常温抗压强度均采用标准值。

## 本规程用词用语说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词、用语说明如下：

(1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。

(2) 表示严格，正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

(3) 表示允许稍有选择，条件允许时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

(4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中必须按指定的标准、规范或其它有关规定执行时，写法为“应按……执行”或“应符合……规定”。

## 引用标准名录

- 1 《钢结构防火涂料》 GB 14907
- 2 《混凝土结构防火涂料》 GB 28375
- 3 《建筑结构荷载规范》 GB 50009
- 4 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 5 《建筑设计防火规范》 GB 50016
- 6 《工程结构可靠性设计统一标准》 GB 50153
- 7 《民用建筑热工设计规范》 GB 50176
- 8 《建筑内部装修设计防火规范》 GB 50222
- 9 《民用建筑工程室内环境污染控制标准》 GB 50325
- 10 《混凝土结构加固设计规范》 GB 50367
- 11 《建筑结构加固工程施工质量验收规范》 GB 50550
- 12 《纤维增强复合材料工程应用技术标准》 GB 50608
- 13 《砌体结构加固设计规范》 GB 50702
- 14 《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》 GB 50728
- 15 《钢管混凝土技术规范》 GB 50936
- 16 《建筑钢结构防火技术规范》 GB 51249
- 17 《建筑构件耐火试验方法（第1部分：通用要求）》 GB/T 9978.1
- 18 《不燃无机复合板》 GB/T 25970
- 19 《工程结构设计基本术语标准》 GB/T 50083
- 20 《工程结构设计通用符号标准》 GB/T 50132
- 21 《组合结构技术规程》 JGJ 138
- 22 《钢结构防火保护板》 XF/T 3012