

中国工程建设标准化协会标准

# 地下公共建筑结构抗火性能设计标准

(征求意见稿)

2014

中国工程建设标准化协会标准

# 地下公共建筑结构防火性能设计标准

主编单位：同济大学

批准单位：中国工程建设标准化协会

2014

# 目录

1	总则.....	5
1.1	范围.....	5
1.2	规范性引用文件.....	5
2	术语和符号.....	6
2.1	术语.....	6
2.2	符号.....	7
3	地下建筑性能化抗火设计的基本要求.....	11
3.1	一般规定.....	11
3.2	建筑抗火设防要求.....	12
3.3	火灾场景.....	13
3.4	结构抗火设计原则.....	14
3.5	防火措施与隔热保护.....	15
4	火灾场景分析.....	17
4.1	一般规定.....	17
4.2	火灾场景设定.....	17
4.3	火灾场景模拟成果.....	18
5	结构材料与防火材料.....	19
5.1	普通混凝土.....	19
5.2	高强混凝土.....	22
5.3	其它类型的混凝土.....	22
5.4	钢材.....	22
5.5	防火板.....	25
5.6	防火涂料.....	25
5.7	其它防火隔热材料.....	26
6	火灾作用效应.....	27
6.1	构件升温计算.....	27
6.2	火灾下结构和构件内力和变形计算.....	29

7	防火验算.....	32
7.1	一般规定.....	32
7.2	防火承载力极限验算.....	33
7.3	隔热极限状态验算.....	36
7.4	精细分析法.....	36
8	防火保护措施.....	38
8.1	保护措施及其选用原则.....	38
8.2	防火保护构造.....	38
8.3	爆裂.....	43
8.4	保护层.....	44
	附录.....	46
	附录A升温曲线.....	46
	附录B 可燃材料的单位发热量.....	51
	附录C ISO-834标准升温曲线下钢构件的温度场.....	52
	附录D混凝土防火承载力简化计算方法.....	60
	附录E精细计算方法.....	67
	附录F有保护层钢构件的截面系数.....	68
	附录G非膨胀型防火涂料和防火板等效热传导系数测试方法.....	70
	附 条文说明.....	75

# 1 总则

## 1.1 范围

- 1.1.1 为有效减轻地下公共建筑结构的火灾损害，制定本设计规范。
- 1.1.2 本规范适合于各类单建式或附建式地下公共建筑的结构性能化抗火设计，不包含上述建筑火灾后维修的设计。
- 1.1.3 结构性能化抗火设计应以建筑的重要性分类和火灾危害性分析为基础。

## 1.2 规范性引用文件

## 2 术语和符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 地下公共建筑Underground public building

位于地面以下，供人们进行各种公共活动的建筑。

#### 2.1.2 抗火设防类别fire-resistance fortification category for structure

根据遭遇火灾后，可能造成的人员伤亡、直接和间接经济损失、社会影响的程度等对建筑物进行的等级划分。

#### 2.1.3 火灾场景fire scenario

指火灾发展与蔓延的全过程。既包括建筑、可燃物等的静态结构和分布，也包括火焰传播，烟气流动等火灾发展与蔓延的动态特性。

#### 2.1.4 特征火灾场景characteristic fire scenario

用来表征某特定情况下的火灾场景。

#### 2.1.5 抗火性态水准fireproofing performance level

在火灾条件下，结构预期达到的性能水平。

#### 2.1.7 抗火承载力极限limit state for fire resistance

在火灾条件下，构件或结构的承载力与外加作用（包括荷载和温度作用）产生的组合效应相等时的状态。

#### 2.1.8 隔热极限状态limit state for insulating fire

在火灾条件下，火灾即将“透过”构件或结构引燃隔壁房间常见可燃物时的状态。

#### 2.1.9 火灾作用效应fire effect

火灾作用引起结构出现的变化的总称。

#### 2.1.10 临界温度critical temperature

假设火灾效应沿构件的长度和截面均匀分布，当构件达到抗火承载力极限

状态时构件截面上的温度。

### 2.1.11 受火面exposed surface

在火灾环境中，直接暴露在火中的结构表面。

### 2.1.12 背火面unexposed surface

在火灾环境中，没有直接暴露在火中的结构表面。

### 2.1.3 精细计算方法advanced method

利用现代数值计算方法同时结合材料高温性能，对火灾下结构的真实响应进行的分析方法。

## 2.2 符号

$A$  —— 构件的毛截面面积；

$B$  —— 构件单位长度综合传热系数；

$B_n$  —— 与梁端部约束情况有关的常数；

$C$  —— 轴向承重构件的极限轴向压缩变形量

$c_c$  —— 混凝土的比热容；

$c_s$  —— 钢材的比热容；

$c_i$  —— 防火保护层的比热容；

$D$  —— 弯曲构件极限弯曲变形量

$d_i$  —— 保护层的厚度；

$E_s$  —— 常温下钢材的弹性模量；

$E_{sT}$  —— 高温下钢材的弹性模量；

$F$  —— 单位长度构件的受火表面积；

$F_i$  —— 单位长度构件保护层的内表面积；

$f$  —— 常温下钢材的设计强度；

$f_y$  —— 常温下钢材的屈服强度；

$f_{yT}$  —— 高温下钢材的屈服强度；

$f_c$  —— 常温下混凝土的抗压强度；

$f_{cT}$  —— 高温下混凝土的抗压强度；

$H$  —— 轴向承载构件初始高度

$h$  —— 构件的截面高度或楼板厚度；

$I$  —— 构件截面惯性矩；

$L$  —— 构件的净跨度

$l$  —— 构件的长度、跨度；

$M_{fi}$  —— 受火构件按等效作用力分析得到的杆端弯矩；

$M_q$  —— 梁上荷载产生的最大弯矩设计值

$M_p$  —— 塑性弯矩；

$M_T$  —— 受火构件的杆端温度弯矩；

$N_f$  —— 受火构件按等效作用力分析得到的轴力；

$N_T$  —— 受火构件的轴向温度内力；

$P$  —— 保护层中的含水率（质量百分比）；

$q$  —— 梁（板）所受的均布荷载或等效均布荷载；

$R$  —— 荷载比；

$R_d$  —— 高温下结构或构件的设计承载力；

$S_m$  —— 高温下结构或构件内的作用效应组合；

$S_{mT}$  —— 作用效应组合的设计值

$S_{GK}$  —— 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

$S_{QK}$  —— 楼面活荷载标准值的效应

$t$  —— 受火时间或耐火时间；

$t'$  —— 构件温度达到100℃所需的时间；

$t_d$  —— 结构或构件的耐火时间；

$t_m$  —— 结构或构件的耐火极限；



$t_v$  —— 延迟时间；  
 $T$  —— 温度  
 $T_c$  —— 混凝土温度  
 $T_0$  —— 受火前钢构件的内部温度；  
 $T_1$ 、 $T_2$  —— 受火构件两侧或上、下翼缘的温度；  
 $T_d$  —— 结构或构件的临界温度；  
 $T_b$  —— 结构或构件的背火面温度  
 $T_g$  —— 对应  $t$  时刻的室内平均空气温度；  
 $T_s$  —— 钢构件温度；  
 $T_m$  —— 在耐火极限时间内结构或构件的最高温度；  
 $V$  —— 单位长度构件的体积；  
 $W_p$  —— 构件的截面塑性模量；  
 $\alpha_s$  —— 钢材的热膨胀系数；  
 $\gamma_{0T}$  —— 结构耐火安全系数  
 $\gamma_R$  —— 钢构件的抗力分项系数，抗火设计中钢材强度调整系数；  
 $\chi_{cT}$  —— 高温下混凝土的初始弹性模量折减系数  
 $\chi_{sT}$  —— 高温下钢材的弹性模量折减系数  
 $\eta_{cT}$  —— 高温下混凝土强度折减系数  
 $\eta_{tT}$  —— 高温下普通混凝土的抗拉强度折减系数  
 $\eta_T$  —— 高温下钢材强度折减系数；  
 $\nu_s$  —— 钢材的泊松比；  
 $\lambda_c$  —— 混凝土的热传导系数  
 $\lambda_i$  —— 保护材料的热传导系数；  
 $\lambda_s$  —— 钢材的热传导系数；

$\rho_c$  —— 混凝土的密度；

$\rho_i$  —— 保护层的密度；

$\rho_s$  —— 钢材的密度；

$\sigma$  —— 应力

$\varepsilon_c(T)$  —— 混凝土膨胀应变

$\alpha_c$  —— 对流传热系数

$\alpha_r$  —— 辐射传热系数；

$\psi_f$  —— 楼面活荷载的频遇值系数

$\psi_q$  —— 楼面活荷载的准永久值系数

$\Delta t$  —— 时间增量；

$\Delta T$  —— 构件或结构的温度变化；

## 3 地下建筑性能化防火设计的基本要求

### 3.1 一般规定

3.1.1 地下公共建筑防火设防类别应划分为重要设防类（Ⅰ类）、标准设防类（Ⅱ类）、适度设防类（Ⅲ类）三类。

1. 重要设防类：指规模庞大，造价高，内部人流密集的标志性建筑，一旦发生火灾会造成重大人员伤亡和财产损失以及严重社会影响的地下公共建筑。简称Ⅰ类。

2. 标准设防类：指除Ⅰ、Ⅲ类之外需要按标准要求进行火灾设防的地下公共建筑。简称Ⅱ类。

3. 适度设防类：指人员相对稀少的小规模的建筑，火灾发生可能性低，危害小的地下公共建筑。简称Ⅲ类。

3.1.2 地下公共建筑的火灾危害性可用特征火灾场景表征。特征火灾场景可分为常规火灾场景、不利火灾场景、特大火灾场景三级。

1. 常规火灾场景：建筑物内火源为点或小范围的火灾，不考虑火势蔓延至周围可燃物；

2. 不利火灾场景：火灾考虑从火源点蔓延至周边可燃物，建筑物内发生局部或区域的火灾；

3. 特大火灾场景：建筑物内部发生整体或大范围的突发型火灾。

3.1.3 地下建筑结构的防火性能水准可划分为正常运行、结构可修、生命安全三个水准。

A级. 正常运行水准：结构受火时完好，过火后不需修理可继续使用。

B级. 结构可修水准：结构受火时可能损坏，过火后经一般修理仍可以使用。

C级. 生命安全水准：结构受火时不倒塌，过火后不发生严重损毁。

3.1.4 地下建筑结构的防火性能水准应根据建筑的防火设防类别和火灾场景确

定。

表3.1.4 地下建筑结构的抗火性态水准

抗火设防类别	常规火灾场景	不利火灾场景	特大火灾场景
I类	A级	A级	B级
II类	A级	B级	C级
III类	B级	C级	C级

3.1.5地下公共建筑应按照结构的抗火性态水准确定防火设计的性能指标。

表3.1.5 结构火灾性能指标

抗火性态水准	性能指标
A级	防火材料耐火极限
B级	隔热状态
C级	承载力极限状态

## 3.2 建筑抗火设防要求

3.2.1 地下公共建筑火灾性能化设防目标如下：

1. 防止火灾扩展或延缓火情增长，减少火灾损失；
2. 防止建筑物的结构受到严重破坏而发生垮塌，或虽有局部垮塌，但不会发生连续垮塌而影响建筑物结构的整体稳定性；
3. 保障建筑物内财产的安全。
4. 缩短建筑功能的恢复周期。

3.2.2符合下列功能与规模的地下公共建筑，应为重要设防类（I类）。

1. 城市防灾应急的大规模物资储备库；
2. 涉及国家安全的重要民防工程；
3. 两线（不含）以上换乘或地下部分层数超过3层的大型地铁车站；
4. 停车位超过500辆的大型地下停车库；

5. 拥有不少于5000观众座位的地下体育馆；
6. 大型地下影剧院和音乐厅，面积不少于5000平方米的地下展览馆；
7. 藏书量超过10万册的地下图书馆，或大型图书馆的地下藏书库；
8. 面积超过50000平方米、层数超过三层的大型地下商贸建筑和地下综合体。

3.2.3 使用功能和规模符合3.2.2条的类似或相近的建筑，应为重要设防类（I类）。

3.2.4 单体面积小于100平方米的地下运动馆、健身房、地下商店，面积小于2000平方米的小型地下车库，以及面积不大于500平方米的地下公共建筑，应为适度设防类（III类）。

3.2.5 与地上建筑合建的地下建筑，应考虑地面建筑的重要性和使用功能。

### 3.3 火灾场景

3.3.1 地下建筑结构应根据火灾名义空气升温曲线确定火灾场景，典型空气升温曲线列于附录A。

3.3.2 地下公共建筑特征火灾场景分类标准可依据建筑火灾场景的热释放速率快慢以及空间内空气升温曲线确定。

1. 常规火灾场景：火灾过程中，热释放速率按美国国家防火协会（NFPA）的t<sub>2</sub>模型计算为中速或快速；空气升温曲线不超过ISO-834。
2. 不利火灾场景：火灾过程中，热释放速率按NFPA的t<sub>2</sub>模型计算达到快速型，并出现短时间的轰燃现象；空气温度峰值达到1000℃以上，升温曲线超过ISO-834，接近RABT曲线。
3. 特殊火灾场景（主要是发生爆炸、以及存放大量易燃物场合出现火灾）：火灾过程中，出现火源范围大，火场温度整体均超过1000℃，升温曲线超过RABT曲线。

3.3.3 火灾设防分类为I类的地下建筑应进行火灾场景模拟计算，以得到建筑物的室内空气升温曲线；火灾设防分类为II类的地下建筑宜进行火灾场景模拟；火灾设防分类为III类的地下建筑可不进行火灾场景模拟。

3.3.4 采用火灾场景模拟的地下建筑或其中的部分区域，若得到的空气升温曲线

没有ISO-834标准升温曲线严厉，应选择ISO-834曲线。火灾持续时间可按火灾场景模拟结果选取。

3.3.5未进行火灾场景模拟的地下建筑，其空气升温曲线应按以下方式选用：

1. 火灾设防分类为II类的地下建筑或其部分，如室内可燃物密度大、空间环境密闭程度高应选择RABT升温曲线，否则宜选择HC升温曲线。

2. 火灾设防分类为III类的地下建筑，室内空气升温曲线一般应选择ISO-834升温曲线，若室内可燃物密度大、空间环境密闭高，室内空气升温曲线一般可选择HC升温曲线。

### 3.4 结构抗火设计原则

3.4.1 地下建筑结构应根据表3.4.1确定的耐火极限，选择合适的建筑结构与构件、或防火分隔部件，进行结构抗火极限状态设计，以及采取防火隔热措施。

1. 抗火设防类I类的地下建筑结构与构件，应采用钢筋混凝土结构或钢-混凝土结构组合结构，并应设计附加防火措施；

2. 抗火设防类II类的地下建筑结构与构件，宜采用钢筋混凝土结构或钢-混凝土结构组合结构。当采用钢结构时，应设计附加防火措施；

3. 抗火设防类III类地下建筑结构与构件，不宜采用可燃材料，其各部件的耐火时间不应低于表3.4.1的要求。

表3.4.1结构构件的耐火极限（h）

构件或部件		耐火极限
结构构件	柱	3.00
	梁	2.00
	楼板/顶板	2.00
	承载墙	3.00
	电梯井的墙	2.00
	楼梯间的墙	2.00
	疏散楼梯间	1.50

3.4.2 结构的抗火承载力极限状态规定如下：

1.当满足下列条件之一时，结构构件应视为达到抗火承载力极限状态：

- (1) 构件整体丧失稳定；
- (2) 构件产生足够的塑性铰而成为可变机构；
- (3) 构件或连接因超过材料强度而破坏；
- (4) 构件达到不适于继续承载的变形。

2.当满足下列条件之一时，结构整体应视为达到抗火承载力极限状态：

- (1) 结构产生足够的塑性铰形成可变机构；
- (2) 结构或结构的一部分作为刚体失去平衡；
- (3) 结构整体丧失稳定。

3.4.3 结构的隔热极限状态

1.当满足下列条件之一时，结构构件应视为达到隔热极限状态：

- (1) 构件出现可以使火焰或热空气穿过的裂缝；
- (2) 构件背火面温度足够高，可以引燃附着的常见易燃物。

2.当满足下列条件之一时，结构整体应视为达到隔热极限状态：

- (1) 构件的连接处产生可以使火焰或热空气穿过的裂缝；
- (2) 结构背火面温度足够高，可以引燃相邻空间的易燃物。

3.4.4火灾设防分类为Ⅰ类的地下建筑应进行整体结构的抗火设计，并验算各构件的抗火性能。构件抗火验算时，应选择相应受火条件的空气升温曲线。

3.4.5火灾设防分类为Ⅱ和Ⅲ类的地下建筑，可仅对地下结构的各构件进行抗火极限状态验算。

## 3.5 防火措施与隔热保护

3.5.1 火灾设防分类为Ⅰ类的地下建筑应设置自动喷淋灭火系统，并对结构构件采取防火保护措施。

3.5.2火灾设防分类为Ⅲ类的地下建筑，当设有自动喷水灭火系统时各类构件可不再采取防火保护措施。

3.5.3火灾设防分类为Ⅰ类和Ⅱ类的地下公共建筑，需满足《建筑设计防火规范》（GB50016）规定的防火分区、防火间隔、消防给水、消防通道、灭火设施、

通风、照明等要求。



## 4 火灾场景分析

### 4.1 一般规定

4.1.1 火灾场景分析的目标如下：

1. 准确反应建筑火灾场景下的空间烟气参数特性的分布规律及随时间变化规律。

2. 为抗火性能化设计提供参考依据。

4.1.2 地下公共建筑可利用数值模拟的方式进行火灾场景分析，火灾场景应以真实的火灾现场特性为基础进行研究。

4.1.3 火灾场景分析时需确定火源位置、火源强度、持续时间等火源特性，以及真实结构构件的尺寸和材料热工性能。

4.1.4 对于重要设防类（I类）建筑，火灾场景分析时应考虑实际环境的通风、防排烟、水喷淋系统等条件的影响。

### 4.2 火灾场景设定

4.2.1 常规火灾场景的火源位置应选择建筑物内典型区域以及具有大量电气设备、电线、纸类、橡胶塑料等易燃物的地点。

4.2.2 不利以及特大火灾场景的火源位置选择还应考虑行人出入口、楼梯口、应急逃生通道、消防通道等对疏散消防影响重要的地点。

4.2.3 火源为常见可燃物单一物质燃烧时，其燃烧热值可按附录B确定，并通过计算可燃物火灾荷载得到火源强度。

4.2.4 当火灾为复杂燃烧过程，在可燃物有限的地下空间内火源强度建议选择2MW。考虑人为纵火及其它爆炸物时，火源强度最低值建议选择5MW。

4.2.5 地铁列车着火时，单独一辆列车的火源强度取7.5MW，新型地铁列车可以选择5.0MW，车辆上的旅客行李最高可选择2.5MW。

4.2.6 火灾场景分析时火源持续时间不得低于6min。对于火灾设防分类为I类的地下建筑火源持续时间建议至少为3h。

4.2.7 机械通风口应根据实际工程设定送/排风风速，排风风速不宜大于10m/s。

### 4.3 火灾场景模拟成果

4.3.1 火源附近的烟气温度及流速分布情况可通过模拟得到；对于楼梯口和逃生通道附近还需就计算烟气温度分布和空间能见度。

4.3.2 地下建筑设计时宜结合火灾场景模拟得到的烟气分布情况采取相应排烟措施，在火灾场景初期6min内，建筑内能见度应满足不小于10m的疏散要求。

4.3.3 火灾场景模拟可得到空间气体流速，气体流速应满足建筑在正常使用状态下人员和设备对风速的要求。

4.3.4 火灾场景模拟可得到建筑空间内温度分布情况。逃生路径的温度分布在火灾初期6min内不宜超过60℃。

## 5 结构材料与防火材料

### 5.1 普通混凝土

5.1.1 普通混凝土高温下的热传导系数应按式 (5.1.1) 采用。

$$\lambda_c = 1.68 - 0.19 \frac{T_c}{100} + 0.82 \times 10^{-2} \left( \frac{T_c}{100} \right)^2 \quad 20^\circ\text{C} \leq T_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (5.1.1)$$

式中： $\lambda_c$ ——温度为 $T$ 时普通混凝土的热传导系数 [W/(m·°C)]；

$T_c$ ——混凝土的当前温度 (°C)。

5.1.2 普通混凝土高温下的比热变化应按式(5.1.2)确定。

$$\begin{aligned} c_c &= 900 & 20^\circ\text{C} \leq T_c \leq 100^\circ\text{C} \\ c_c &= 900 + (T_c - 100) & 100^\circ\text{C} < T_c \leq 200^\circ\text{C} \\ c_c &= 1000 + (T_c - 200) / 2 & 200^\circ\text{C} < T_c \leq 400^\circ\text{C} \\ c_c &= 1100 & 400^\circ\text{C} < T_c \leq 1200^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (5.1.2)$$

式中： $c_c$ ——温度为 $T$ 时混凝土的比热容 [J/(kg·°C)]。

5.1.3 高温下普通混凝土的密度可认为是与温度无关的常量，取值宜按式 (5.1.3) 确定。

$$\rho_{cT} = 0.95\rho_c \quad (5.1.3)$$

式中： $\rho_{cT}$  高温下混凝土的密度 (kg/m<sup>3</sup>)；

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

5.1.4 普通混凝土高温下自由膨胀应变可按混凝土骨料类型分别计算。

1. 硅质骨料混凝土可由式 (5.1.4-1) 和 (5.1.4-2) 确定：

$$\varepsilon_c(T_c) = -1.8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} T_c + 2.3 \times 10^{-11} T_c^3 \quad 20^\circ\text{C} \leq T_c \leq 700^\circ\text{C} \quad (5.1.4-1)$$

$$\varepsilon_c(T_c) = 14 \times 10^{-3} \quad 700^\circ\text{C} < T_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (5.1.4-2)$$

式中： $\varepsilon_c(T_c)$ ——温度为 $T$ 时混凝土的自由膨胀应变。

2. 钙质骨料混凝土可由式（5.1.4-3）和（5.1.4-4）确定：

$$\varepsilon_c(T_c) = -1.2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6} T_c + 1.4 \times 10^{-11} T_c^3 \quad 20^\circ\text{C} \leq T_c \leq 805^\circ\text{C} \quad (5.1.4-3)$$

$$\varepsilon_c(T_c) = 12 \times 10^{-3} \quad 805^\circ\text{C} < T_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (5.1.4-4)$$

5.1.5 混凝土的热膨胀系数可由高温下的普通混凝土自由膨胀应变计算。

5.1.6 在高温下，普通混凝土的轴心抗压强度折减系数可按式（5.1.6-1） - （5.1.6-4）计算。

$$20^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C}$$

$$\eta_{cT}(T_c) = 1.0 - 1.2 \times 10^{-3} (T_c - 20) \quad (5.1.6-1)$$

$$\eta_{cT}(T_c) = 0.64 + 3.40 \times 10^{-3} T_c - 7.95 \times 10^{-6} T_c^2 + 3.50 \times 10^{-9} T_c^3 \quad 100^\circ\text{C} < T_c \leq 700^\circ\text{C}$$

$$(5.1.6-2)$$

$$\eta_{cT}(T_c) = 0.325 - 1.083 \times 10^{-3} (T_c - 700) \quad 700^\circ\text{C} < T_c \leq 1000^\circ\text{C} \quad (5.1.6-3)$$

$$\eta_{cT}(T_c) = 0 \quad 1000^\circ\text{C} < T_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (5.1.6-4)$$

式中： $\eta_{cT}(T)$ ——普通混凝土的轴心抗压强度折减系数。

5.1.7 高温下普通混凝土的抗拉强度折减系数可按式（5.1.7-1）和式（5.1.7-2）计算。

$$\eta_{cT}(T_c) = 1 - 0.001 T_c \quad 20^\circ\text{C} \leq T_c \leq 1000^\circ\text{C} \quad (5.1.7-1)$$

$$\eta_{tT}(T_c) = 0 \quad 1000^\circ C < T_c \leq 1200^\circ C \quad (5.1.7-2)$$

式中： $\eta_{tT}$ ——高温下普通混凝土的抗拉强度折减系数

5.1.8高温下普通混凝土的初始弹性模量折减系数可按式（5.1.8-1）-（5.1.8-4）计算。

$$\chi_{cT} = 1.0 - 1.725 \times 10^{-3} (T_c - 20) \quad 20^\circ C \leq T_c \leq 100^\circ C \quad (5.1.8-1)$$

$$\chi_{cT} = 1.04 - 1.86 \times 10^{-3} T_c + 8.38 \times 10^{-7} T_c^2 \quad 100^\circ C < T_c \leq 700^\circ C \quad (5.1.8-2)$$

$$\chi_{cT} = 0.149 - 4.967 \times 10^{-4} (T_c - 700) \quad 700^\circ C < T_c \leq 1000^\circ C \quad (5.1.8-3)$$

$$\chi_{cT} = 0 \quad 1000^\circ C < T_c \leq 1200^\circ C \quad (5.1.8-4)$$

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

5.1.9高温下普通混凝土的应力-应变关系可按式（5.1.9-1）和式（5.1.9-2）计算。

$$\sigma = \begin{cases} f_{cT} \left[ 2.2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0T}} - 1.4 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0T}} \right)^2 + 0.2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0T}} \right)^3 \right] & 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{0T} \\ f_{cT} \frac{\varepsilon / \varepsilon_{0T}}{0.8(\varepsilon / \varepsilon_{0T} - 1)^2 + \varepsilon / \varepsilon_{0T}} & \varepsilon > \varepsilon_{0T} \end{cases} \quad (5.1.9-1)$$

$$20^\circ C \leq T \leq 1200^\circ C$$

$$\varepsilon_{0T} = [1 + (1500T + 5T^2) \times 10^{-6}] \varepsilon_0 \quad (5.1.9-2)$$

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。

## 5.2 高强混凝土

5.2.1在高温下，高强混凝土的有关物理参数应根据相应的测试标准通过试验测定。

5.2.2不具备试验条件时，可采用普通混凝土的物理参数。

5.2.3 高温下高强混凝土的轴心抗压强度的折减系数，按式（5.2.3-1） - （5.2.3-5）计算。

$$\begin{aligned} \eta_{cT} &= 1 & T_c &\leq 50^\circ\text{C} & (5.2.3-1) \\ \eta_{cT} &= 1.28 - 0.0056T_c & 50^\circ\text{C} < T_c &\leq 100^\circ\text{C} & (5.2.3-2) \\ \eta_{cT} &= 0.72 & 100^\circ\text{C} < T_c &\leq 350^\circ\text{C} & (5.2.3-3) \\ \eta_{cT} &= 1.31 - 0.00168T_c & 350^\circ\text{C} < T_c &\leq 778^\circ\text{C} & (5.2.3-4) \\ \eta_{cT} &= 0 & 778^\circ\text{C} < T_c &\leq 1200^\circ\text{C} & (5.2.3-5) \end{aligned}$$

## 5.3 其它类型的混凝土

5.3.1 其它类型的结构混凝土，应根据相关试验标准测试其在高温下的材料特性。

5.3.2 非结构类混凝土可以仅测试其极限耐火时间。

## 5.4 钢材

5.4.1在高温下，钢材的有关物理参数应按表5.4.1采用。

表5.4.1高温下钢材的物理参数

参数名称	符号	数值	单位
------	----	----	----

热膨胀系数	$\alpha_s$	$1.4 \times 10^{-5}$	$\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
热传导系数	$\lambda_s$	45	$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
比热容	$c_s$	600	$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$
密度	$\rho_s$	7850	$\text{kg}/\text{m}^3$
泊桑比	$\nu_s$	0.3	—

5.4.2 在高温下，普通钢材的弹性模量应按下式计算：

$$E_{sT} = \chi_{sT} E_s \quad (5.4.2-1)$$

$$\chi_{sT} = \begin{cases} \frac{7T_s - 4780}{6T_s - 4760} & 20^\circ\text{C} \leq T_s < 600^\circ\text{C} \\ \frac{1000 - T_s}{6T_s - 2800} & 600^\circ\text{C} \leq T_s < 1000^\circ\text{C} \\ 0 & 1000^\circ\text{C} \leq T_s \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5.4.2-2)$$

式中： $T_s$ ：温度（ $^\circ\text{C}$ ）；

$E_{sT}$ ：温度为 $T_s$ 时钢材的初始弹性模量（ $\text{N}/\text{mm}^2$ ）；

$E_s$ ：常温下钢材的弹性模量（ $\text{N}/\text{mm}^2$ ），按现行《钢结构设计规范》

（GB 50017）确定；

$\chi_{sT}$ ：高温下钢材的弹性模量折减系数。

5.4.3 在高温下，普通钢材的屈服强度应按下式计算：

$$f_{yT} = \eta_T f_y \quad (5.4.3-1)$$

$$f_y = \gamma_R f \quad (5.4.3-2)$$

$$\eta_T = \begin{cases} 1.0 & 20^\circ\text{C} \leq T_s \leq 300^\circ\text{C} \\ 1.24 \times 10^{-8} T_s^3 - 2.096 \times 10^{-5} T_s^2 \\ \quad + 9.228 \times 10^{-3} T_s - 0.2168 & 300^\circ\text{C} < T_s < 800^\circ\text{C} \\ 0.5 - T_s / 2000 & 800^\circ\text{C} \leq T_s < 1000^\circ\text{C} \\ 0 & 1000^\circ\text{C} \leq T_s \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5.4.3-3)$$

式中： $f_{yT}$ ：温度为 $T_s$ 时钢材的屈服强度（N/mm<sup>2</sup>）；

$f_y$ ：常温下钢材的屈服强度（N/mm<sup>2</sup>）；

$f$ ：常温下钢材的强度设计值（N/mm<sup>2</sup>），按现行《钢结构设计规范》（GB 50017）确定；

$\gamma_R$ ：钢构件抗力分项系数，近似取 $\gamma_R = 1.1$ ；

$\eta_T$ ：高温下钢材强度折减系数。

5.4.4在高温下，耐火钢的弹性模量和屈服强度可分别按式(5.4.2-1)和式(5.4.2-1)确定。其中，弹性模量折减系数 $\chi_T$ 和屈服强度折减系数 $\eta_T$ 应分别按式（5.4.4-1）和（5.4.4-2）确定。

$$\chi_{sT} = \begin{cases} 1 - \frac{T_s - 20}{2520} & 20^\circ\text{C} \leq T_s < 650^\circ\text{C} \\ 0.75 - \frac{7(T_s - 650)}{2500} & 650^\circ\text{C} \leq T_s < 900^\circ\text{C} \\ 0.5 - 0.0005 T_s & 900^\circ\text{C} \leq T_s < 1000^\circ\text{C} \\ 0 & 1000^\circ\text{C} \leq T_s \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5.4.4-1)$$

$$\eta_T = \begin{cases} \frac{6(T_s - 768)}{5(T_s - 918)} & 20^\circ\text{C} \leq T_s < 700^\circ\text{C} \\ \frac{1000 - T_s}{8(T_s - 600)} & 700^\circ\text{C} \leq T_s < 1000^\circ\text{C} \\ 0 & 1000^\circ\text{C} \leq T_s \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5.4.4-2)$$



## 5.5 防火板

5.5.1当钢结构采用防火板保护时，可采用低密度防火板、中密度防火板和高密度防火板。

5.5.2防火板材应符合下列要求：

1. 应为不燃性材料；
2. 受火时不炸裂，不产生穿透裂纹；
3. 生产厂家应提供产品的热传导系数（500℃时）或等效热传导系数、密度和比热容等参数。防火板的等效热传导系数可按附录G的规定测定。

5.5.3防火板和防火涂料应能在地下空间潮湿的环境中保持工作性能。

## 5.6 防火涂料

5.6.1当钢结构采用防火涂料保护时，可采用膨胀型或非膨胀型防火涂料。

5.6.2钢结构防火涂料的技术性能除应符合现行国家标准《钢结构防火涂料》（GB 14907）的规定外，还应符合下列要求：

**1** 生产厂家应提供非膨胀型防火涂料的热传导系数（500℃时）、比热容、含水率和密度参数，或提供等效热传导系数、比热容和密度参数。非膨胀型防火涂料的等效热传导系数可按附录G的规定测定。

**2** 主要成份为矿物纤维的非膨胀型防火涂料，当采用干式喷涂施工工艺时，应有防止粉尘、纤维飞扬的可靠措施。

5.6.3对于裸露型钢结构，耐火极限小于1.5h时可选用薄型防火涂料，耐火极限大于1.5h时应选用厚型防火涂料；混凝土结构应选用厚型防火涂料。

5.6.4 涂料中不应含有石棉及甲醛等有害物质，在施工中及使用过程中不

应挥发有害物质及刺激性气味，在火灾高温条件下不应释放有毒气体。

## 5.7 其它防火隔热材料

5.7.1 钢结构也可采用砌块、混凝土或金属网抹M5砂浆等其它隔热材料作为防火保护层。

5.7.2 隔热材料作为钢结构的防火保护层时，生产厂家除应提供强度和耐候性参数外，尚应提供热传导系数（500℃时）或等效热传导系数及密度、比热容等参数。

5.7.3 其它防火隔热材料的等效热传导系数可参照附录G的规定测定。

## 6 火灾作用效应

### 6.1 构件升温计算

6.1.1 梁、柱等杆系构件的温度场可简化为横截面上的二维温度场，而墙、板等平面构件的温度场简化为沿厚度方向的一维温度场。

6.1.2 构件或结构的温度场可通过按照《建筑构件耐火试验方法》(GBT 9978.1)相关规定进行或其它能保证结果正确性的试验获得。

6.1.3 构件或结构的温度场可通过数值计算获得，构件温度场宜采用热传导方程并结合相应的初始条件和边界条件进行计算。

6.1.4 混凝土截面在一个方向受到火灾作用时，截面混凝土的温度为：

$$T_x = \eta_x \eta_s T_g \quad (6.1.4-1)$$

式中：  $\eta_x = 0.18 \ln(U_x) - 0.81$

$$U_x = \frac{K_c}{4.17 \times 10^{-7}} \frac{t_s}{x^2}$$

$$\eta_s = 1 - 0.0616 t_s^{-0.88}$$

$$K_c \text{ 为热扩散率} \quad K_c = \frac{\lambda}{\rho c}$$

比例时间  $t_s = (\gamma / \gamma_i) t$

$$\gamma = \frac{A_w \sqrt{h_w} / A_t}{b} \left( \frac{1160}{0.04} \right)$$

$$\gamma_i = \sqrt{b / 1550}$$

$$b = \sqrt{k_c \rho_c c_c}$$

若在两个方向都受火灾作用时：

$$T_{xy} = [n_x(n_x + n_y - 2n_x n_y) + n_x n_y] T_g \quad (6.1.4-2)$$

6.1.5 在ISO 834标准火灾升温条件下，无防火保护层的钢构件和采用不同参数防

火被覆构件的升温也可按附录C查表确定。

6.1.6火灾下钢构件的升温可按下列增量法计算，其初始温度取20℃：

$$T_s(t + \Delta t) = \frac{B}{\rho_s c_s} [T_g(t) - T_s(t)] \cdot \Delta t + T_s(t) \quad (6.1.6)$$

式 中	$\Delta t$ ——	时间增量 (s)，不宜超过30s；
	$T_s$ ——	钢构件温度 (°C)；
	$T_g$ ——	火灾下钢构件周围空气温度 (°C)；
	$B$ ——	钢构件单位长度综合传热系数 [W/(m <sup>3</sup> ·°C)]，按第6.1.7条计算；
	$c_s$ ——	钢材的比热容，按表5.4.1取值；
	$\rho_s$ ——	钢材的密度，按表5.4.1取值。

6.1.7钢构件单位长度综合传热系数  $B$  可按下列公式计算：

1构件无防火保护层时：

$$B = (\alpha_c + \alpha_r) \frac{F}{V} \quad (6.1.7-1)$$

$$\alpha_r = \varepsilon_r \sigma \frac{(T_g + 273)^4 - (T_s + 273)^4}{T_g - T_s} \quad (6.1.7-2)$$

式中  $F$  —— 构件单位长度的受火表面积 (m<sup>2</sup>/m)；

$V$  —— 构件单位长度的体积 (m<sup>3</sup>/m)；

$\alpha_c$  —— 对流传热系数，取  $\alpha_c = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ ；

$\alpha_r$  —— 辐射传热系数 [W/(m<sup>2</sup>·°C)]；

$\varepsilon_r$  —— 综合辐射率，通常取  $\varepsilon_r = 0.5$ ；

$\sigma$  —— 斯蒂芬—波尔兹曼常数， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

2构件有非膨胀型保护层时：

$$B = \frac{1}{1 + \frac{c_i \rho_i d_i F_i}{2c_s \rho_s V}} \cdot \frac{\lambda_i}{d_i} \cdot \frac{F_i}{V} \quad (6.1.7-3)$$

式中  $c_i$  —— 保护材料的比热容 [J/(kg·K)]；

$\rho_i$ ——保护材料密度 ( $\text{kg/m}^3$ ) ;

$d_i$ ——保护材料厚度 ( $\text{m}$ ) ;

$\lambda_i$ ——保护材料 $500^\circ\text{C}$ 时的热传导系数或等效热传导系数 [ $\text{W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ];

$F_i$ ——构件单位长度防火保护材料的内表面积 ( $\text{m}^2/\text{m}$ ) 。

各类构件的  $F_i/V$  值可按附录F采用。

6.1.8当钢构件的防火被覆中含有水分时,宜考虑钢构件的升温延迟现象。其内部温度可按下式计算

$$\begin{aligned} T'_s(t) &= T_s(t) & t < t' \\ T'_s(t) &= 100^\circ\text{C} & t' \leq t \leq t' + t_v \\ T'_s(t) &= T_s(t + t_v) & t > t' + t_v \end{aligned} \quad (6.1.8)$$
$$t_v = \frac{12P\rho_i d_i^2}{\lambda_i}$$

式中  $t_v$ ——延迟时间, (s), 当有实测数据时, 延迟时间  $t_v$  可采用实测值。;

$t'$ ——构件温度达到 $100^\circ\text{C}$ 的时间;

$P$ ——保护层中的含水率(质量百分比);

$T'_s(t)$ ——考虑延迟现象的影响时, 构件在  $t$  时刻的内部温度;

$T_s(t)$ ——不考虑延迟现象的影响时, 构件在  $t$  时刻的内部温度, 按第6.1.2、6.1.3、6.1.5或6.1.6条确定。

当采用由附录G确定的防火被覆的等效热传导系数计算钢构件的升温时, 可不考虑防火被覆中水分引起的延迟时间。

## 6.2 火灾下结构和构件内力和变形计算

6.2.1在进行结构抗火计算时, 应考虑温度内力和变形的影响; 若对结构受力有利则不予考虑。

6.2.2计算结构中某一构件受火升温的温度内力和变形时, 可将受火构件的温度

效应等效为杆端作用力（图6.2.2），并将该作用力作用在与该杆端对应的结构节点上，然后按常温下的分析方法进行结构分析，得到该构件升温对结构产生的温度内力和变形。其中，受火构件的温度内力可按下式确定

$$N_T = N_{Te} - N_f \quad (6.2.2-1)$$

$$N_{Te} = \alpha_s E_T A \left( \frac{T_1 + T_2}{2} - T_0 \right)$$

$$M_{Ti} = M_{Te} - M_{fi} \quad (6.2.2-2)$$

$$M_{Te} = \frac{E_T I}{h} \alpha_s (T_2 - T_1)$$

式中  $N_T$ ——受火构件的轴向温度内力（压力）；

$N_f$ ——按等效作用力分析得到的受火构件的轴力（受拉为正）；

$M_{Ti}$ ——受火构件的杆端温度弯矩（方向与图6.2.2b所示  $M_{Te}$  方向相反）；

$M_{fi}$ ——按等效作用力分析得到的受火构件的杆端弯矩（方向与图6.2.2b所示  $M_{Te}$  方向一致为正）；

$T_1$ 、 $T_2$ ——受火构件两侧或上下翼缘的温度，对于有保护层钢构件可取

$$T_1 = T_2；$$

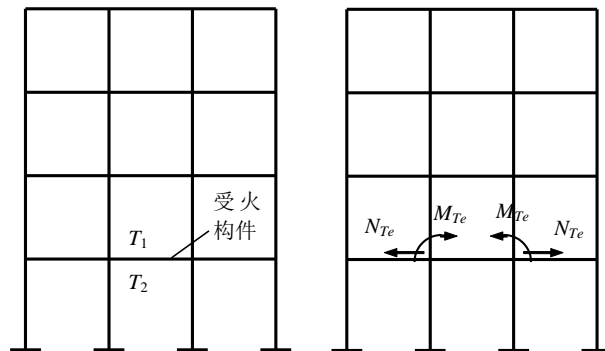
$T_0$ ——受火前构件的温度；

$E_T$ ——温度为  $(T_1 + T_2)/2$  时钢材的弹性模量；

$A$ ——受火构件的截面面积；

$I$ ——受火构件的截面惯性矩；

$h$ ——受火构件的截面高度。



(a) 构件的升温

(b) 等效作用力

图6.2.2结构温度效应等效为杆端作用力

6.2.3 计算钢框架柱的温度内力时，如仅考虑该柱升温（相邻柱不升温），则该柱的温度内力可根据计算结果折减30%。

6.2.4 钢结构构件抗火验算时，受火构件在外荷载作用下的内力，可采用常温下相同荷载所产生的内力乘以折减系数0.9。

6.2.5 若需要分析计算结构、子结构在火灾下的内力和变形性能，应使用附录E的数值分析方法，进行分析。

## 7 抗火验算

### 7.1 一般规定

7.1.1 在火灾下，有承载要求的构件需满足7.2条的相关规定。

7.1.2 作为防火分区的一部分的隔火构件，应能满足7.3条有关规定。

7.1.3 既有承重要求，又有隔火要求的构件应同时满足7.2和7.3的要求。

7.1.4 混凝土结构、钢结构、钢-混凝土组合结构构件的抗火性能可按6章的规定分析。复杂结构可通过按照《建筑构件耐火试验方法》（GBT 9978.1）相关规定进行或其它能保证结果正确性的试验获得。

7.1.5 承载构件或结构的承载力抗火设计应满足下列要求之一：

1. 在规定的结构耐火极限时间内，结构或构件的承载力 $R_d$ 不应小于各种作用所产生的组合效应 $S_m$ ，即：

$$R_d \geq S_m \quad (7.1.5-1)$$

2. 在各种荷载效应组合下，结构或构件的耐火时间 $t_d$ 不应小于规定的结构或构件的耐火极限 $t_m$ ，即：

$$t_d \geq t_m \quad (7.1.5-2)$$

3. 结构或构件的临界温度 $T_d$ 不应低于在耐火极限时间内结构或构件的最高温度 $T_m$ ，即：

$$T_d \geq T_m \quad (7.1.5-3)$$

7.1.6 隔热构件或结构的隔火抗火设计应满足下列要求：

在规定的结构隔火时间内，结构或构件的背火面温度 $T_b$ 不应大于要求的



最高温度  $T_i$ ，即：

$$T_b \leq T_i \quad (7.1.6-4)$$

## 7.2 抗火承载力极限验算

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

$$S_{mT} = \gamma_{0T} (S_{GK} + S_{TK} + \psi_f S_{QK}) \quad (7.2.1-1)$$

$$S_{mT} = \gamma_{0T} (S_{GK} + S_{TK} + \psi_q S_{QK}) \quad (7.2.1-2)$$

式中：  $S_{mT}$  作用效应组合的设计值；

$S_{GK}$  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；

$S_{QK}$  楼面活荷载标准值的效应；

$\psi_f$  楼面活荷载的频遇值系数，按《建筑结构荷载规范》GB50009

$\psi_q$  楼面活荷载的准永久值系数，按《建筑结构荷载规范》GB50009

$\gamma_{0T}$  结构耐火安全系数，性态水准A级的地下结构取值1.30，B级为1.20，C级为1.15。

### 1. 温度作用效应

温度作用效应主要是指温度引起的轴力和弯矩，下列情况可不予考虑：

- (1) 认为可以忽略或是对结构受力有利的
- (2) 支撑模型或边界条件保守的考虑了这些荷载

下列情况的温度作用效应必须考虑：

- (1) 有约束边界构件的热膨胀，例如多层框架结构中的柱子
- (2) 超静定结构差异热膨胀，例如连续楼板
- (3) 热梯度引起的内力

## 2. 常温荷载

- (1) 火灾时可能存在的所有荷载均需要考虑
- (2) 忽略火灾引起的荷载减小

## 3. 进行构件分析时，可认为

(1) 只有在横截面上热力梯度引起的热变形的作用需要考虑。轴向和平面内的热膨胀可以忽略。

(2)  $t=0$ 时刻构件的支撑和边缘的边界条件，在整个火灾暴露时间内假设是不变的。

7.2.2 高温普通混凝土结构、钢结构、钢-混凝土组合结构的承载力计算和变形可采用常温下普通混凝土构件的计算原则和方法，但钢和混凝土的力学性能需依据截面温度场进行相应的修正。

7.2.3 构件高温承载力验算中，钢和混凝土的强度采用标准值。

7.2.4 在火灾时，有承载要求的构件，应满足：

1. 高温下，结构的承载力高于所受荷载；
2. 不产生不适于继续承载的变形。

(1) 抗弯构件的极限弯曲变形量

$$D = \frac{L}{20} \quad (7.2.4-1)$$

式中：L 构件的净跨度

(2) 轴向承重构件的极限轴向压缩变形量

$$C = \frac{H}{100} \text{ mm} \quad (7.2.4-2)$$

式中：H 初始高度，单位为毫米（mm）。

7.2.5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，具体计算方法见附录D。

7.2.6高温下钢框架梁承载力验算可在条款1或2中任选其一，其它钢结构构件可参考相关钢结构抗火规范计算。

1.火灾时，按图7.2.6所示钢框架梁承载力极限状态，应按下式验算其高温承载力：

$$M_q \leq M_{pT} \quad (7.2.6-1)$$

$$M_{pT} = W_p \eta_T \gamma_R f \quad (7.2.6-2)$$

$$M_q = \frac{B_n}{8} q l^2 \quad (7.2.6-3)$$

式中  $M_q$  —— 梁上荷载产生的最大弯矩设计值，不考虑温度内力；当梁承受的荷载为非均布荷载时，可按简支梁跨间最大弯矩等效的原则，将其等效为均布荷载；

$q$  —— 火灾时梁承受的均布荷载设计值；

$l$  —— 梁的跨度；

$B_n$  —— 与梁端部连接有关的参数，当梁两端铰接时  $B_n = 1$ ，当梁两端刚接时  $B_n = 0.5$ ；

$M_{pT}$  —— 高温下梁截面的塑性抵抗弯矩；

$W_p$  —— 梁截面的塑性截面模量。

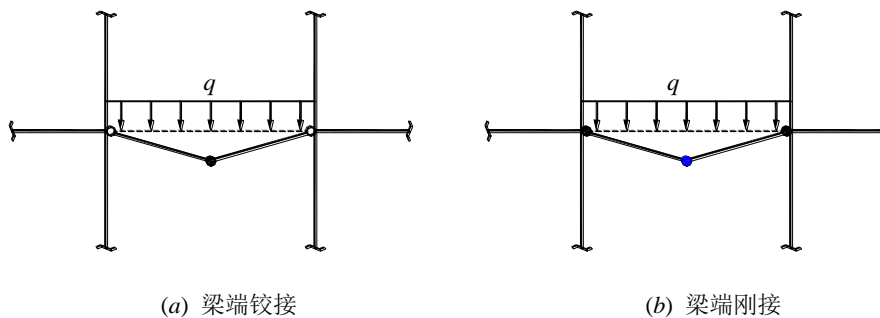


图7.2.6框架梁的极限状态

2. 钢框架梁的临界温度  $T_d$  可按表7.2.6-1、表7.2.6-2确定。其截面强度荷载比  $R$  可按下式计算：

$$R = \frac{M_q}{W_p f} \quad (7.2.6-4)$$

表7.2.6-1普通结构钢构件根据截面强度荷载比  $R$  确定的临界温度  $T_d$  (°C)

$R$	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
$T_d$	676	656	636	617	599	582	564	546	528	510	492	472	452

表7.2.6-2耐火钢构件根据截面强度荷载比  $R$  确定的临界温度  $T_d$  (°C)

$R$	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
$T_d$	726	713	702	690	677	661	643	622	599	571	537	497	447

7.2.7 钢-混凝土组合结构可通过7.4条计算，或是使用经过验证的方法或结果。

### 7.3 隔热极限状态验算

7.3.1 火灾时，有防火要求的构件，在火灾过程中应能防止火焰和热空气穿过构件，到达未受火面。

1 构件上不能产生使热空气或火焰穿过的裂缝；

2 若有进一步严格要求，应满足背火面平均温升不高于140°C，极值点的温升不许超过180°C。

### 7.4 精细分析法

7.4.1 精细算法是对火灾下构件、子结构或结构进行非线性全过程分析，方法

具体内容见附录E。

7.4.2 若使用3，应满足下列条件：

1. 精细计算法应该给出暴露于火灾结构的真实分析。应基于基本的物理行为，得到相关结构构件在火灾条件下的可靠的近似的预期行为。

2. 精细计算法中没有包含的任何潜在的破坏模型应通过合适的方法进行排除（包括不充足的转动能力、剥落、爆裂、受压区钢筋局部屈曲、受剪和粘结破坏、锚具损伤）。

3. 精细计算法应包括以下计算模型来确定：

-结构构件内温度发展和分布（温度响应模型）

-结构和任意子结构的力学行为（力学响应模型）

4. 精细计算法应能与任何升温曲线相协调，只要相关温度范围和相关温升速率下材料的性能是已知的。

5. 精细计算法应能用于任何形式的横截面。

## 8 防火保护措施

### 8.1 保护措施及其选用原则

8.1.1 结构可采用下列防火保护措施：

- 1 外包混凝土或砌筑砌体
- 2 涂敷防火涂料
- 3 防火板包覆
- 4 柔性毡状隔热材料包覆
- 5 复合防火保护，即在结构表面涂敷防火除料或采用柔性毡状隔热材料包覆，再用轻质防火板作饰面板

8.1.2 结构防火保护措施应按照安全可靠、经济实用的原则选用，并应考虑下列条件：

- 1 在要求的耐火极限内能有效地保护结构构件。
- 2 防火材料应易于与结构构件结合，并对结构构件不产生有害影响。
- 3 当结构构件受火产生允许变形时，防火保护材料不应发生结构性破坏，仍能保持原有的保护作用直至规定的耐火时间。
- 4 施工方便，易于保证施工质量。
- 5 防火保护材料不应对人体有毒害。

### 8.2 防火保护构造

8.2.1 采用外包混凝土或砌筑砌体的结构防火保护构造宜按图8.2.1选用。

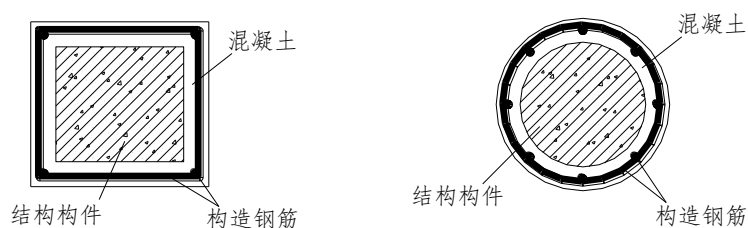


图 8.2.1 采用外包混凝土的防火保护构造

8.2.2采用防火涂料的结构防火保护构造宜按图8.2.2选用。当钢结构采用非膨胀型防火涂料进行防火保护且有下列情形之一时，涂层内应设置与钢构件相连接的钢丝网：

- 1承受冲击、振动荷载的构件。
- 2涂层厚度不小于30mm的构件。
- 3粘结强度不大于0.05MPa的钢结构防火涂料。
- 4涂层幅面较大。

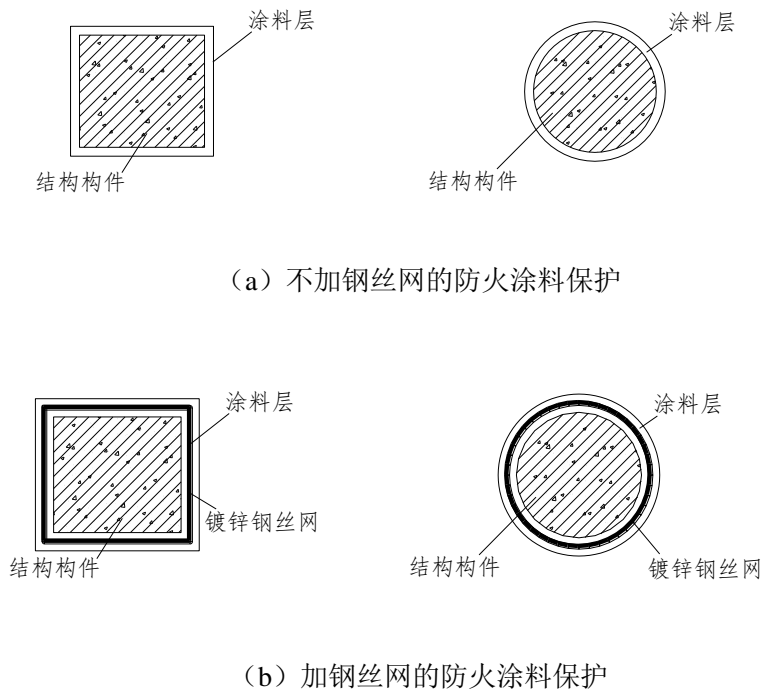
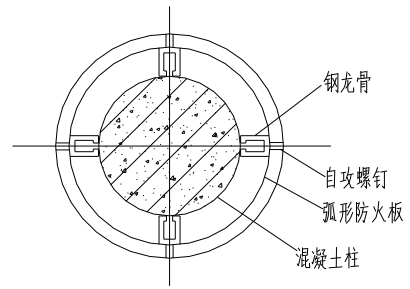
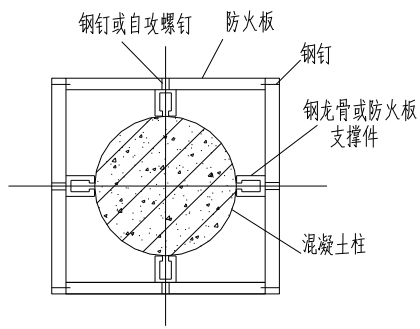
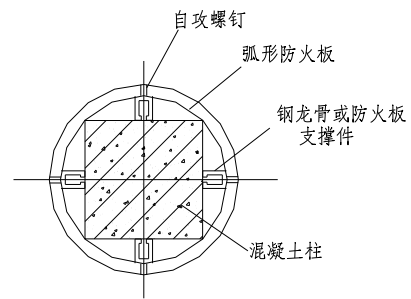
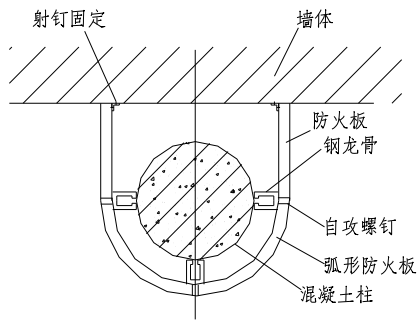


图 8.2.2 采用防火涂料的防火保护构造

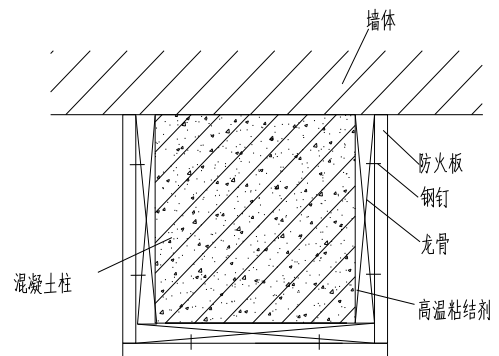
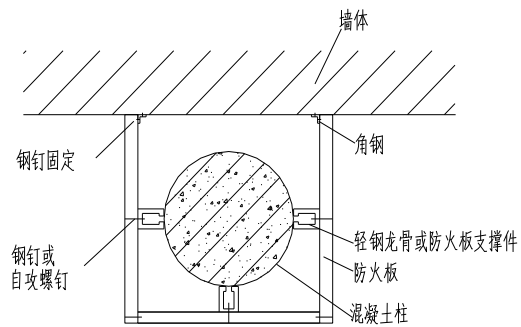
8.2.3采用防火板的结构防火保护构造宜按图8.2.3选用。



(a) 圆柱包矩形防火板 (b) 圆柱包圆弧形防火板

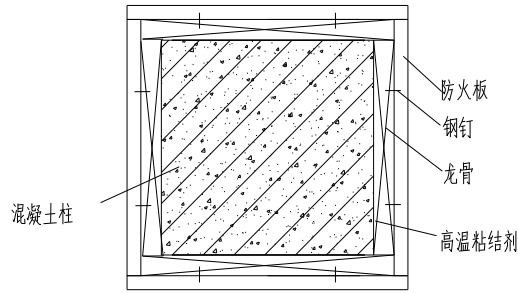


(c) 靠墙圆柱包弧形防火板 (d) 矩形柱包圆弧形防火板



(e) 靠墙圆柱包矩形防火板 (f) 靠墙矩形柱包矩形防火板





(g) 独立矩形柱包矩形防火板

图 8.2.3 采用防火板的防火保护构造

8.2.4 采用柔性毡状隔热材料的结构防火保护构造宜按图 8.2.4 选用

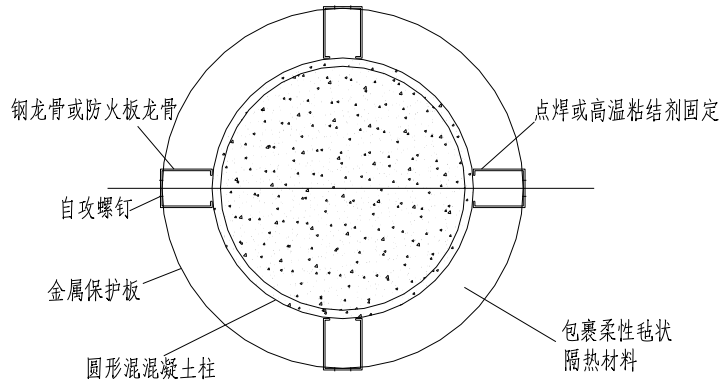
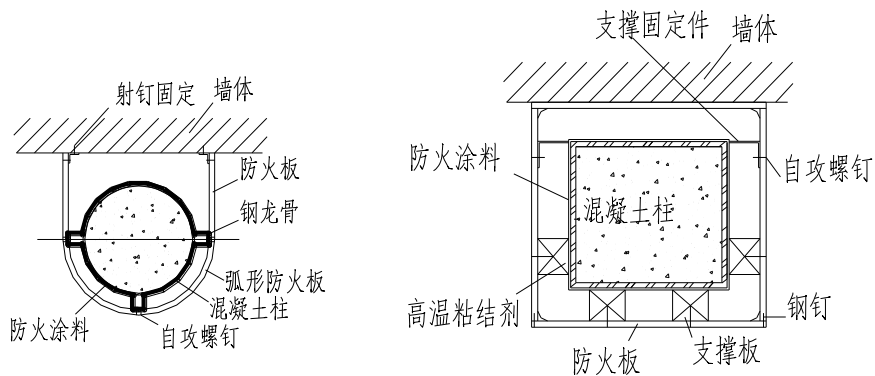
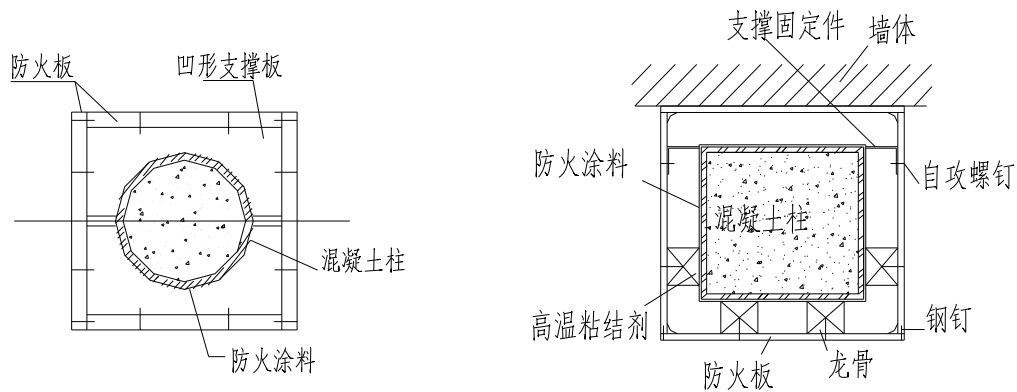


图 8.2.4 采用柔性毡状隔热材料的结构防火保护构造

8.2.5 混凝土结构采用复合防火保护的构造宜按图 8.2.5-1 ~ 图 8.2.5-3 选用。

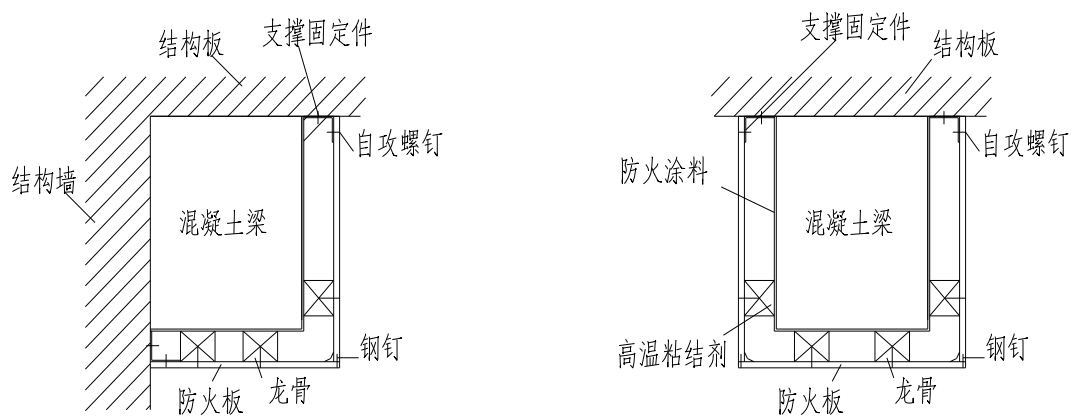


(靠墙做法)



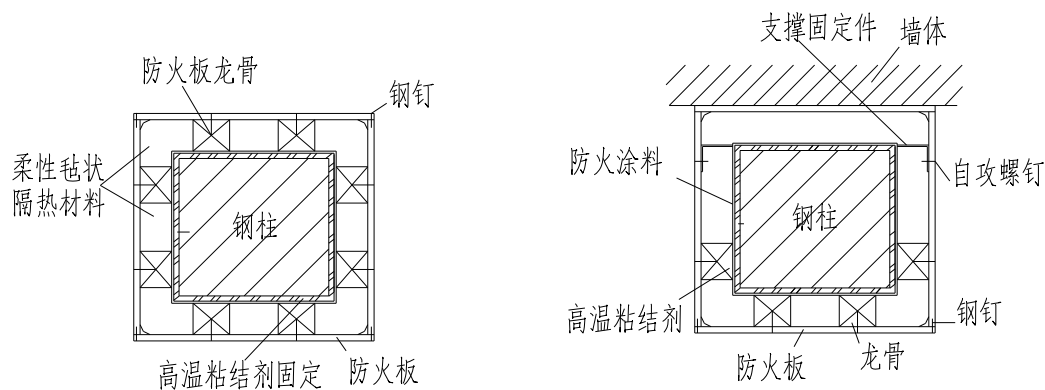
(不靠墙做法)

图 8.2.5-1 混凝土柱采用防火涂料和防火板的复合防火保护构造



(a) 靠墙的梁 (b) 一般的梁

图 8.2.5-2 混凝土梁采用防火涂料和防火板的复合防火保护构造



(a) 一般矩形柱 (b) 靠墙矩形柱

图 9.2.5-3 钢柱采用柔性和防火板的复合防火保护构造

## 8.3 爆裂

8.3.1 爆裂影响的内部因素主要包括混凝土水灰比、含水率、外掺料、骨料、渗透性、试件形状；外部因素包括升温速率、应力—温度途径方式和荷载水平等。

### 8.3.2 爆裂的防治措施

1. 表面隔热防护方法：利用防火板、防火喷涂料等隔断或者减弱施加到混凝土结构上的热荷载。
2. 掺加聚丙烯纤维的方法：在混凝土内掺加聚丙烯纤维可以有效抵抗混凝土爆裂。
3. 优先选用具有以下特性的骨料：热稳定性好、热膨胀小、表面粗糙、多棱角、含活性硅、尺寸小。
4. 选用水泥凝胶中  $C/S(CaO/SiO_2)$  比例较小的水泥，或在水泥中掺加粉煤灰、高炉炉渣减小  $C/S(CaO/SiO_2)$  比例。
5. 通过适当的养护措施，降低混凝土内的含湿量。

## 8.4 保护层

8.4.1混凝土结构抗火构件的保护层最小厚度首先应满足《混凝土结构设计规范》（GB50010）要求的最小保护层厚度，净保护层最小厚度应符合表8.4.3；

8.4.2混凝土结构抗火构件的保护层最小厚度应综合考虑以下因素：

- 1、结构构件耐火极限要求；
- 2、结构构件类型；
- 3、结构构件尺寸；
- 4、结构构件约束条件；
- 5、受火形式。

8.4.3结构梁的混凝土保护层最小厚度应符合以下规定：

表8.4.3 混凝土梁保护层最小厚度

约束条件	梁截面宽度 b (mm)	耐火极限 (min)			
		60	90	120	180
简支	$200 \leq b < 300$	45mm	50mm	65mm	采取特殊措施
简支	$b > 300$	40mm	45mm	50mm	65mm
连续	$200 \leq b < 300$	40mm	40mm	45mm	50mm
连续	$b > 300$	40mm	40mm	40mm	45mm

注：表中数值是针对控制截面受弯承载力与其组合弯矩之比  $K=1.7$  提出的，对于  $K \neq 1.7$  的情况，应将表中数值乘以  $(1.7/K)^{0.5}$ ；混凝土保护层厚度同时指梁底和梁侧的混凝土保护层厚度。受弯承载力计算时，钢筋和混凝土强度采用标准值。

8.4.4结构柱的混凝土保护层最小厚度应符合以下规定：

表8.4.4 混凝土柱保护层最小厚度

耐火极限 (min)	截面最小尺寸/混凝土保护层最小厚度 (mm)			
	多面受火			单面受火
	K=5	K=2	K=1.4	K=1.4

30	200/25	200/25	200/32 300/27	155/25
60	200/25	200/36 300/31	250/46 350/40	155/25
90	200/31 300/25	300/45 400/38	300/53 450/40**	155/25
120	250/40 350/35	350/45** 450/40**	350/57** 450/51**	175/35
180	350/45**	350/63**	450/70**	230/55
240	350/61**	450/75**	-	295/70

注：表中 K 为控制截面受弯承载力与其组合弯矩之比；标\*\*处表示柱内所用钢筋不少于 8 根。受弯承载力计算时，钢筋和混凝土强度采用标准值。

#### 8.4.5 结构板的混凝土保护层最小厚度应符合以下规定：

表8.4.5-1：单向板的混凝土保护层最小厚度

约束条件	耐火极限 (min)			
	60	90	120	180
简支	25mm	30mm	40mm	55mm
连续	20mm	20mm	25mm	30mm

表8.4.5-2：双向板的混凝土保护层最小厚度

长短边之比	耐火极限 (min)			
	60	90	120	180
≤1.5	20mm	20mm	25mm	30mm
1.5~2	25mm	30mm	35mm	45mm

注：表中数值是针对板厚不小于 180mm 和控制截面受弯承载力与其组合弯矩之比  $K=1.7$  提出的。板厚  $h$  小于 180mm 时，应将表中数值乘以  $(180/h)^{0.2}$ ；对于  $K \neq 1.7$  的情况，应将表中数值乘以  $(1.7/K)^{0.5}$ ；受弯承载力计算时，钢筋和混凝土强度采用标准值。

# 附录

## 附录A 升温曲线

### A. 1 标准升温曲线

ISO 834标准升温曲线，如（A.1）式计算。对流换热系数

$$\alpha_c = 25W / (m^2 \cdot K)。$$

$$T_g = T_0 + 345 \log_{10}^{(8t+1)} \quad (A.1)$$

式中：  $T_g$ ：火灾时空气温度(°C)

$T_0$ ：室温(°C)

t：时间 (min)

### A. 2 HC升温曲线，如（A.2）式计算。

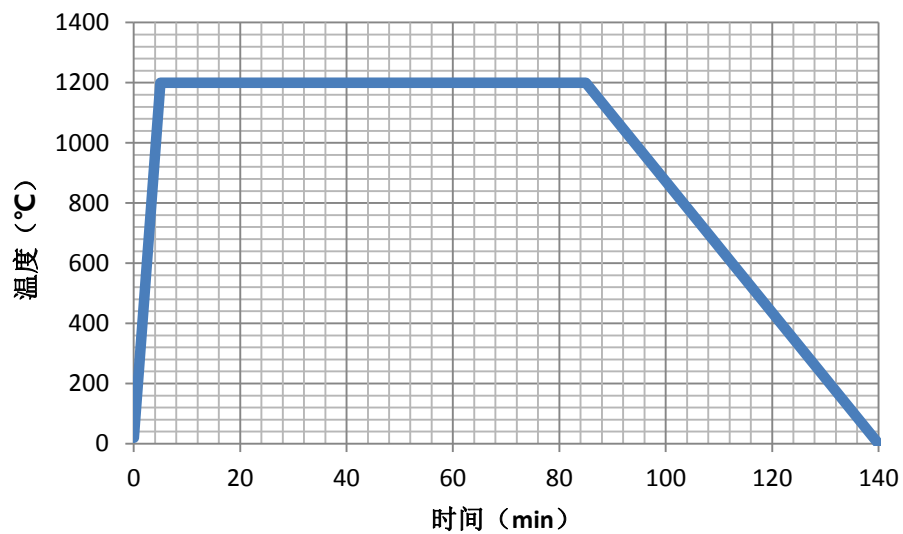
$$T_g = T_0 + 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) \quad (A.2)$$

式中：  $T_g$ ：火灾时空气温度(°C)

$T_0$ ：室温(°C)

t：时间 (min)

### A.3RABT升温曲线，如图A-1。建议对流换热系数 $\alpha_c = 50W / (m^2 \cdot K)$ 。



图A-1: RABT升温曲线

A.4一般地下建筑室内火灾空气温度可按下式计算：对流换热系数

$$\alpha_c = 50W / (m^2 \cdot K)。$$

温度上升阶段：

$$T_g = T_0 + 1325(1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*}) \quad (A.4-1)$$

式中： $t^*$ 为虚拟时间，单位为小时  $t^* = t \cdot \Gamma$

$\Gamma$ 为虚拟时间系数， $\Gamma = [O/b]^2 / (0.04/1160)^2$

$O$ 为开口因子  $O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t$  实用范围为  $0.02 \leq O \leq 0.2$

$A_v$ 为墙壁所有开洞面积 ( $m^2$ )

$b$ 为热惰性参数  $b = \sqrt{\rho c \lambda}$  并且  $100 \leq b \leq 2200$

$\rho$ 为围护材料密度， $c$ 围护材料比热  $\lambda$ 围护材料热传导系数

$h_{eq}$ 为开洞平均高度

$A_t$ 整个围护面积

升温段持续时间： $t_{\max} = \max[(0.2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O), t_{\lim}]$

$t_{\lim}$ 为火灾受限制时间，即可燃物的完全燃烧所需时间

$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f / A_t$  并且  $50 \leq q_{t,d} \leq 1000$

$q_{f,d}$ 为火灾荷载密度设计值

如果  $t_{\max} = t_{\lim}$  则燃烧由燃料控制，则对应开口率和虚拟时间系数

$\Gamma$ 做如下修改：

$$O_{\lim} = 0.1 \cdot 10^{-3} q_{t,d} / t_{\lim}$$

$$\Gamma_{\lim} = [O_{\lim} / b]^2 / (0.04/1160)^2$$

相应的虚拟时间  $t^* = t \cdot \Gamma_{\lim}$

此外，如果同时满足条件  $O > 0.04$ ,  $q_{t,d} < 75$ , 并且  $b < 1160$ ,  $\Gamma_{\lim}$

还应乘以下列系数进行修正

$$k = 1 + \left( \frac{O - 0.04}{0.04} \right) \left( \frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \left( \frac{1160 - b}{1160} \right)$$

下降段的温度与时间关系为：

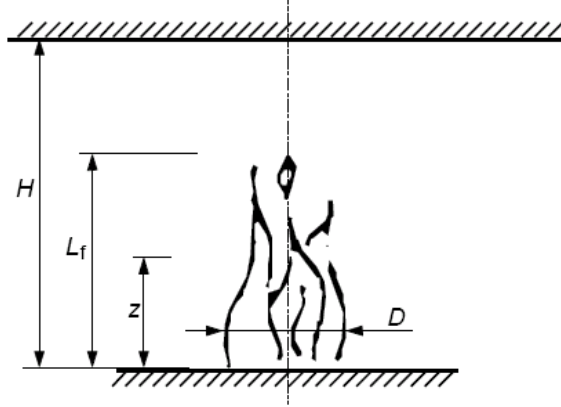
$$\begin{cases} T_g = T_{\max} - 625(t^* - t_{\max}^* \bullet x) & \text{当 } t_{\max}^* \leq 0.5 \\ T_g = T_{\max} - 250(3 - t_{\max}^*)(t^* - t_{\max}^* \bullet x) & \text{当 } 0.5 \leq t_{\max}^* \leq 2 \\ T_g = T_{\max} - 250(t^* - t_{\max}^* \bullet x) & \text{当 } t_{\max}^* \geq 2 \end{cases} \quad (\text{A.4-2})$$

式中：  $t^* = t \bullet \Gamma$  并且  $t_{\max} = (0.2 \bullet 10^{-3} \bullet q_{t,d} / O) \bullet \Gamma$

当  $t_{\max} > t_{\lim}$   $x = 1.0$ ；当  $t_{\max} = t_{\lim}$   $x = t_{\lim} \bullet \Gamma / t_{\max}^*$

A.5大空间地下建筑室内火灾空气温度可按下式计算：

1) 当火灾较小，火焰高度没有到达顶部防火区  $L_f < H$  时，以火焰中心为轴，距离轴心任何位置的温度为：



$$T_z = T_0 + 0.25Q_c^{2/3}(z - z_0)^{-5/3} \leq 900 \quad (\text{A.5-1})$$

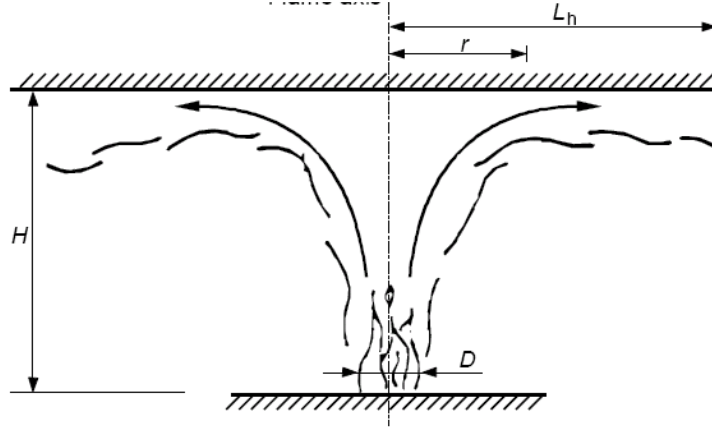
式中：火焰高度  $L_f = -1.02D + 0.0148Q^{2/5}$

$D$  为火焰直径； $Q$  燃烧的热释放率； $Q_c$  为燃烧的热释放率的对流部分，默认值为  $Q_c = 0.8Q$ ； $z$  是计算位置在  $z$  方向距离火焰原点  $z_0$  的距离， $H$  是空间高度。



$$\text{火焰原点 } z_0 = -1.02D + 0.00524Q^{2/5}$$

2) 当火灾较大, 火焰高度到达顶部防火区  $L_f > H$  时, 顶部结构或非结构构件每单位面积的热量流入, 即天花板每单位曝火面积的热流为:



$$\begin{cases} \dot{h} = 100000 & y \leq 0.3 \\ \dot{h} = 136300 \sim 121000y & 0.3 \leq y \leq 1.0 \\ \dot{h} = 15000y^{-3.7} & y \geq 1.0 \end{cases} \quad (\text{A.5-2})$$

$$\text{式中 } y = \frac{r + H + z'}{L_h + H + z'}$$

$r$  是计算的位置距离火焰的轴心的水平距离,  $H$  是火源到顶部的距离,  $L_h$  为水平方向的羽流尺寸,  $L_h = 2.9H(Q_H^*)^{0.33} - H$ ;  $Q_H^*$  是热释放参数  $Q_H^* = Q/(1.11 \cdot 10^6 \cdot H^{2.5})$ ;  $z'$  是垂直方向热源的原点:

$$\begin{cases} z' = 2.4D(Q_D^{*2/5} - Q_D^{*2/3}) & Q_D^* \leq 1.0 \\ z' = 2.4D(1.0 - Q_D^{*2/5}) & Q_D^* \geq 1.0 \end{cases} \quad (\text{A.5-3})$$

$$\text{式中 } Q_D^* = Q/(1.11 \cdot 10^6 \cdot D^{2.5})$$

如果天花板自身温度为  $T_m$ , 考虑天花板向空气传递热量, 天花板上每单位面积接收的净热流量为:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h} - \alpha_c \cdot (T_m - 20) - \phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(T_m + 273)^4 - 293^4]$$

(A.5-4)

附录B 可燃材料的单位发热量

材 料	热值 /MJ· kg <sup>-1</sup>	材 料	热值 /MJ· kg <sup>-1</sup>	材 料	热值 /MJ· kg <sup>-1</sup>	材 料	热值 /MJ· kg <sup>-1</sup>
<b>固体</b>		粗石蜡	47	加固材料	21	石蜡油	41
无烟煤	34	泡沫橡胶	37	聚苯乙烯	44	烈酒	29
柏油	41	异戊二烯橡胶	45	聚异氰酸酯	20	焦油	38
沥青	42	轮胎	32	泡沫塑料	24	苯	40
纤维素	17	丝绸	19	聚碳酸酯	29	苯甲醇	33
木炭	35	稻草	16	聚丙烯	43	乙醇	27
服装	19	木材	18	聚氨酯	23	异丙基酒精	31
烟煤、焦煤	31	羊毛	23	聚氨酯泡沫	26	<b>气体</b>	
软木	29	微粒板	18	聚氯乙烯	17	乙炔	58
棉花	18	<b>塑料</b>		脲醛树脂	15	丁烷	46
谷物	17	工程塑料	36	脲醛泡沫	14	一氧化碳	10
黄油	41	环氧树脂	19	<b>液体</b>		氢	120
厨房垃圾	18	三聚氰胺树脂	34	汽油	44	丙烷	46
皮革	19	羟基类化合物	18	柴油	41	甲烷	50
油毡	20	甲醛	29	亚麻籽油	39	乙醇	27
纸和纸板	17	聚酯纤维	31	甲醇	20		

## 附录C ISO-834标准升温曲线下钢构件的温度场

C.1标准火灾升温条件下无保护层钢构件的升温可查表C.1确定。

表C.1 标准火灾升温条件下无保护层钢构件的升温 (°C)

时间 (min)	空气温度 (°C)	截面形状系数 $F/V(m^{-1})$									
		10	20	30	40	50	100	150	200	250	300
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
5	576	32	44	56	67	78	133	183	229	271	309
10	678	54	86	118	148	178	311	416	496	552	590
15	739	81	138	193	246	295	491	609	669	697	711
20	781	112	197	277	350	416	638	724	752	763	767
25	815	146	261	365	456	533	737	786	798	802	805
30	842	182	327	453	556	636	799	824	830	833	834
35	865	221	396	538	646	721	838	852	856	858	859
40	885	261	464	618	723	787	866	874	877	879	880
45	902	302	531	690	785	835	888	893	896	897	898
50	918	345	595	752	834	871	906	911	913	914	915
55	932	388	655	805	871	898	922	926	928	929	929
60	945	432	711	848	900	919	936	940	941	942	943
65	957	475	762	883	923	936	949	952	954	954	955
70	968	518	807	911	941	951	961	964	965	966	966
75	979	561	846	933	956	963	972	974	976	976	977
80	988	603	880	952	969	975	982	984	986	986	987
85	997	643	908	968	981	985	992	994	995	995	996
90	1006	683	933	981	991	995	1001	1003	1004	1004	1004

注：1. 当 $F/V < 10$ 时，构件温度应按截面温度非均匀分布计算；

2. 当 $F/V > 300$ 时，可认为构件温度等于空气温度。

C.2  $d_i/\lambda_i$ 为0.01、0.05、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5时标准火灾升温条件下有保护层钢构件的升温可查表C.2-1~C.2-7确定。

表C.2-1  $d_i/\lambda_i$ 为0.01时标准升温条件下有保护层钢构件的升温 (°C)

$d_i/\lambda_i=0.01(m^2 \cdot ^\circ C/W)$		截面形状系数 $F_i/V(m^{-1})$											
时间 (min)	空气温度 (°C)	10	20	30	40	50	100	150	200	250	300	350	400
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
5	576	28	37	45	53	61	99	135	168	200	229	257	282
10	678	42	64	85	105	125	217	296	363	418	465	502	533
15	739	59	96	131	166	198	340	448	527	584	625	653	672
20	781	77	131	182	230	274	455	573	647	692	719	736	746
25	815	97	168	234	295	350	555	669	729	760	777	786	792
30	842	118	206	287	359	423	640	740	785	805	815	821	825
35	865	139	245	339	421	492	709	792	824	838	844	848	851
40	885	161	285	391	481	556	764	831	854	863	868	871	873
45	902	184	324	441	537	614	808	861	878	884	888	891	892
50	918	207	363	489	589	667	844	885	897	903	906	908	909
55	932	230	401	535	638	714	872	905	914	919	921	923	924
60	945	253	438	579	682	756	896	922	929	933	935	937	938
65	957	276	475	621	723	793	916	937	943	946	948	950	951
70	968	300	510	659	760	826	933	950	955	958	960	961	962
75	979	323	545	696	793	854	948	962	967	969	971	972	973
80	988	346	578	729	823	880	961	973	977	980	981	982	983
85	997	369	610	761	851	903	973	983	987	989	991	992	993
90	1006	392	640	790	875	923	984	993	996	999	1000	1001	1001
95	1014	415	669	817	897	940	994	1002	1005	1007	1008	1009	1010
100	1022	437	697	842	917	956	1003	1010	1013	1015	1016	1017	1018
105	1029	459	724	864	935	970	1011	1018	1021	1023	1024	1025	1025
110	1036	481	749	886	951	983	1019	1026	1028	1030	1031	1032	1032
115	1043	503	773	905	966	995	1027	1033	1036	1037	1038	1039	1039
120	1049	524	796	923	980	1006	1034	1040	1042	1044	1045	1045	1046
125	1055	545	818	940	992	1015	1041	1046	1049	1050	1051	1052	1052
130	1061	565	838	955	1003	1024	1048	1053	1055	1056	1057	1058	1058
135	1067	585	858	969	1014	1033	1054	1059	1061	1062	1063	1063	1064
140	1072	605	876	982	1023	1041	1060	1064	1066	1068	1068	1069	1069
145	1077	624	893	994	1032	1048	1066	1070	1072	1073	1074	1074	1075
150	1082	643	910	1006	1041	1055	1071	1075	1077	1078	1079	1080	1080
155	1087	661	925	1016	1048	1061	1077	1080	1082	1083	1084	1085	1085
160	1092	679	940	1026	1056	1067	1082	1085	1087	1088	1089	1089	1090
165	1097	697	953	1035	1062	1073	1087	1090	1092	1093	1094	1094	1094
170	1101	714	966	1044	1069	1079	1091	1095	1097	1098	1098	1099	1099
175	1106	730	979	1052	1075	1084	1096	1099	1101	1102	1103	1103	1103
180	1110	747	990	1059	1081	1089	1101	1104	1105	1106	1107	1107	1108

表C.2-2  $d_i/\lambda_i$ 为0.05时标准升温条件下有保护层钢构件的升温（℃）

$d_i/\lambda_i=0.05(m^2 \cdot ^\circ C/W)$		截面形状系数 $F_i/V(m^{-1})$											
时间 (min)	空气温度 ( $^\circ C$ )	10	20	30	40	50	100	150	200	250	300	350	400
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
5	576	24	27	31	35	38	56	73	90	106	122	137	152
10	678	29	39	48	57	66	109	149	186	221	253	283	310
15	739	36	52	67	82	97	166	227	282	332	375	414	448
20	781	43	66	88	109	129	223	304	373	432	481	523	559
25	815	51	80	109	136	163	280	377	456	519	571	612	645
30	842	59	95	131	164	196	336	445	529	594	644	683	712
35	865	67	111	153	193	230	389	507	594	658	705	739	765
40	885	75	127	175	221	263	439	563	651	712	754	784	806
45	902	83	143	198	249	296	486	615	700	757	795	821	839
50	918	92	159	220	277	329	531	661	743	796	829	851	866
55	932	101	175	242	304	360	573	702	781	828	858	876	888
60	945	110	191	265	331	391	612	740	814	856	882	897	907
65	957	119	207	287	358	421	649	774	842	881	903	916	924
70	968	127	223	308	384	451	683	804	867	902	921	932	939
75	979	136	239	330	410	479	714	831	890	920	937	946	952
80	988	146	255	351	435	507	744	856	909	936	951	959	964
85	997	155	271	372	459	533	771	878	927	951	963	971	975
90	1006	164	287	393	483	559	796	898	943	964	975	981	985
95	1014	173	303	413	506	584	820	916	957	976	986	991	995
100	1022	182	319	433	529	608	842	933	970	987	995	1000	1004
105	1029	191	334	453	551	632	862	948	982	997	1004	1009	1012
110	1036	200	350	472	572	654	881	962	992	1006	1013	1017	1020
115	1043	210	365	491	593	676	899	974	1002	1015	1021	1025	1027
120	1049	219	380	510	614	696	915	986	1012	1023	1029	1032	1035
125	1055	228	395	528	633	716	930	997	1020	1030	1036	1039	1041
130	1061	237	410	546	653	736	945	1007	1028	1038	1043	1046	1048
135	1067	246	424	563	671	754	958	1016	1036	1044	1049	1052	1054
140	1072	255	439	580	689	772	970	1025	1043	1051	1055	1058	1060
145	1077	264	453	597	707	789	982	1033	1050	1057	1061	1064	1066
150	1082	273	467	614	724	806	993	1041	1056	1063	1067	1069	1071
155	1087	282	481	630	740	822	1003	1048	1062	1069	1072	1075	1077
160	1092	291	495	645	756	837	1013	1055	1068	1074	1078	1080	1082
165	1097	300	508	661	772	852	1022	1061	1074	1080	1083	1085	1087
170	1101	309	522	676	787	866	1031	1068	1079	1085	1088	1090	1091
175	1106	318	535	690	801	880	1039	1074	1084	1090	1093	1095	1096
180	1110	327	548	705	815	893	1047	1079	1089	1094	1097	1099	1101

表C.2-3  $d_i/\lambda_i$ 为0.1时标准升温条件下有保护层钢构件的升温 (°C)

$d_i/\lambda_i=0.1(\text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W})$		截面形状系数 $F_i/V(\text{m}^{-1})$											
时间 (min)	空气温度 (°C)	10	20	30	40	50	100	150	200	250	300	350	400
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
5	576	22	24	27	29	31	42	52	63	73	83	92	102
10	678	26	31	36	42	47	73	98	122	145	166	187	207
15	739	29	38	47	56	65	107	147	184	219	251	281	310
20	781	33	46	59	72	84	143	197	246	291	332	369	403
25	815	38	55	72	88	104	179	247	306	359	407	449	486
30	842	42	64	84	105	125	216	295	364	423	475	519	558
35	865	47	72	97	122	145	251	342	418	482	536	582	621
40	885	51	82	111	139	166	287	386	469	536	592	638	675
45	902	56	91	124	156	187	321	429	516	586	642	686	722
50	918	61	100	138	173	207	355	470	560	631	686	729	763
55	932	66	110	151	190	228	387	509	602	672	726	766	798
60	945	71	119	165	208	248	419	546	640	709	761	800	828
65	957	76	129	178	225	269	450	581	675	743	793	829	855
70	968	81	138	192	242	289	479	614	708	774	821	855	878
75	979	86	148	206	259	309	508	645	738	802	847	878	899
80	988	92	158	219	276	328	536	674	766	828	870	898	918
85	997	97	168	233	293	348	562	702	792	851	890	916	934
90	1006	102	177	246	309	367	588	728	816	873	909	933	949
95	1014	107	187	259	325	385	613	752	839	892	926	948	962
100	1022	113	197	273	342	404	636	776	859	910	942	961	974
105	1029	118	206	286	358	422	659	797	878	926	956	974	986
110	1036	123	216	299	374	440	681	818	896	942	969	985	996
115	1043	129	226	312	389	458	702	837	913	956	981	996	1005
120	1049	134	235	325	405	475	722	856	928	968	992	1006	1014
125	1055	139	245	338	420	492	742	873	942	980	1002	1015	1023
130	1061	145	255	351	435	509	761	889	956	991	1011	1023	1030
135	1067	150	264	363	450	526	778	904	968	1002	1020	1031	1038
140	1072	156	274	376	465	542	796	919	980	1011	1029	1039	1045
145	1077	161	283	388	479	558	812	933	991	1021	1036	1046	1051
150	1082	166	292	401	494	573	828	946	1001	1029	1044	1052	1058
155	1087	172	302	413	508	588	843	958	1011	1037	1051	1059	1064
160	1092	177	311	425	522	603	858	970	1020	1045	1057	1065	1069
165	1097	183	320	437	535	618	872	981	1029	1052	1064	1071	1075
170	1101	188	330	449	549	632	886	991	1037	1059	1070	1076	1080
175	1106	194	339	460	562	646	899	1001	1045	1065	1075	1081	1085
180	1110	199	348	472	575	660	911	1010	1052	1071	1081	1087	1090

表C.2-4  $d_1/\lambda_1$ 为0.2时标准升温条件下有保护层钢构件的升温 (°C)

$d_1/\lambda_1=0.2(\text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W})$		截面形状系数 $F_1/V(\text{m}^{-1})$											
时间 (min)	空气温度 (°C)	10	20	30	40	50	100	150	200	250	300	350	400
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
5	576	22	22	24	25	26	32	38	44	50	55	61	67
10	678	26	26	29	32	35	49	64	77	91	104	117	130
15	739	29	30	35	40	45	69	92	114	135	156	176	195
20	781	33	34	41	48	55	89	121	152	181	208	234	259
25	815	38	39	48	57	66	110	151	189	225	259	291	321
30	842	42	44	55	67	78	131	181	227	269	309	345	379
35	865	47	48	62	76	89	153	211	264	312	356	397	434
40	885	51	53	70	86	101	174	240	300	353	402	445	485
45	902	56	58	77	95	113	196	269	335	393	445	491	532
50	918	61	64	85	105	125	217	298	369	431	486	534	576
55	932	66	69	92	115	137	238	326	402	468	525	574	617
60	945	71	74	100	125	149	259	354	434	503	561	611	654
65	957	76	79	108	135	161	280	380	465	536	596	646	689
70	968	81	85	115	145	173	301	407	495	568	628	679	721
75	979	86	90	123	155	185	321	432	523	598	659	709	750
80	988	92	95	131	165	197	341	457	551	627	688	738	778
85	997	97	101	139	175	209	361	481	577	654	715	764	803
90	1006	102	106	147	185	222	380	505	603	680	741	788	826
95	1014	107	112	154	195	233	399	528	627	705	765	811	848
100	1022	113	117	162	205	245	418	550	651	728	787	833	868
105	1029	118	123	170	215	257	436	572	673	750	808	853	886
110	1036	123	128	178	225	269	455	592	695	771	829	871	904
115	1043	129	134	186	235	281	472	613	716	792	847	889	919
120	1049	134	140	194	245	292	490	632	736	811	865	905	934
125	1055	139	145	202	255	304	507	652	755	829	882	920	948
130	1061	145	151	210	264	316	524	670	773	846	898	935	961
135	1067	150	156	217	274	327	540	688	791	862	913	948	973
140	1072	156	162	225	284	338	556	705	808	878	927	961	985
145	1077	161	167	233	294	350	572	722	824	893	940	972	995
150	1082	166	173	241	303	361	588	739	839	907	952	984	1005
155	1087	172	179	248	313	372	603	754	854	920	964	994	1015
160	1092	177	184	256	322	383	618	770	868	933	976	1004	1023
165	1097	183	190	264	332	394	632	785	882	945	986	1013	1032
170	1101	188	195	272	341	405	647	799	895	957	996	1022	1040
175	1106	194	201	279	350	415	661	813	908	968	1006	1031	1047
180	1110	199	206	287	360	426	674	826	920	978	1015	1039	1054



表C.2-5  $d_1/\lambda_1$ 为0.3时标准升温条件下有保护层钢构件的升温 (°C)

$d_1/\lambda_1=0.3(\text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W})$		截面形状系数 $F_1/V(\text{m}^{-1})$											
时间 (min)	空气温度 (°C)	10	20	30	40	50	100	150	200	250	300	350	400
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
5	576	21	22	23	23	24	28	32	37	41	45	49	53
10	678	22	24	26	28	30	40	50	60	70	79	88	98
15	739	23	27	30	34	37	54	70	86	101	116	131	145
20	781	25	30	35	40	44	68	91	113	134	155	174	194
25	815	27	33	39	46	52	83	112	140	167	193	218	241
30	842	28	36	44	52	60	98	134	168	200	231	260	288
35	865	30	40	49	59	68	113	155	195	233	268	301	332
40	885	32	43	54	65	76	129	177	223	265	304	341	375
45	902	33	46	59	72	85	144	199	250	297	340	380	416
50	918	35	50	65	79	93	160	221	276	327	374	417	456
55	932	37	54	70	86	101	175	242	303	358	407	452	493
60	945	39	57	75	93	110	191	263	328	387	439	486	529
65	957	41	61	81	100	119	206	284	354	415	470	519	562
70	968	43	65	86	107	127	222	305	378	443	500	550	594
75	979	44	68	91	114	136	237	325	403	470	529	580	625
80	988	46	72	97	121	145	252	346	426	496	556	608	654
85	997	48	76	102	128	153	267	365	449	521	583	635	681
90	1006	50	80	108	135	162	283	385	472	545	608	661	706
95	1014	52	83	114	143	171	297	404	494	569	632	686	731
100	1022	54	87	119	150	179	312	423	515	592	656	709	754
105	1029	56	91	125	157	188	327	441	536	614	678	732	776
110	1036	58	95	130	164	197	341	459	556	635	700	753	796
115	1043	60	99	136	171	205	356	477	576	656	720	773	816
120	1049	62	103	142	179	214	370	495	595	676	740	792	834
125	1055	64	107	147	186	223	384	512	614	695	759	811	852
130	1061	66	111	153	193	231	398	529	632	713	777	828	868
135	1067	68	115	158	200	240	411	545	650	731	795	845	884
140	1072	71	118	164	207	248	425	561	667	748	812	861	899
145	1077	73	122	170	214	257	438	577	683	765	828	876	913
150	1082	75	126	175	222	265	452	593	700	781	843	890	927
155	1087	77	130	181	229	274	465	608	715	797	858	904	939
160	1092	79	134	187	236	282	477	623	731	811	872	917	951
165	1097	81	138	192	243	291	490	637	746	826	885	930	963
170	1101	83	142	198	250	299	503	651	760	840	898	942	974
175	1106	85	146	203	257	307	515	665	774	853	911	953	984
180	1110	87	150	209	264	316	527	679	788	866	923	964	994

表C.2-6  $d_1/\lambda_1$ 为0.4时标准升温条件下有保护层钢构件的升温 (°C)

$d_1/\lambda_1=0.4(\text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W})$		截面形状系数 $F_1/V(\text{m}^{-1})$											
时间 (min)	空气温度 (°C)	10	20	30	40	50	100	150	200	250	300	350	400
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
5	576	21	21	22	23	23	26	30	33	36	39	42	45
10	678	22	23	25	26	28	36	43	51	58	66	73	80
15	739	23	25	28	30	33	46	58	71	83	95	106	118
20	781	24	28	31	35	39	57	74	92	108	125	141	156
25	815	25	30	35	40	44	68	91	113	135	155	175	195
30	842	26	32	38	44	50	80	108	135	161	186	210	233
35	865	27	35	42	49	57	92	125	157	187	216	244	270
40	885	29	37	46	55	63	104	142	179	213	246	277	307
45	902	30	40	50	60	69	116	160	201	239	276	310	342
50	918	31	43	54	65	76	128	177	222	265	305	342	377
55	932	33	46	58	70	82	140	194	244	290	333	373	410
60	945	34	48	62	76	89	153	211	265	315	361	403	442
65	957	36	51	66	81	96	165	228	286	339	388	432	473
70	968	37	54	70	87	102	177	245	307	363	414	461	503
75	979	39	57	75	92	109	190	262	328	387	440	488	531
80	988	40	60	79	98	116	202	279	348	410	465	514	559
85	997	42	63	83	103	123	214	295	368	432	489	540	585
90	1006	43	65	87	109	130	226	312	387	454	513	565	611
95	1014	45	68	92	114	136	239	328	406	475	536	589	635
100	1022	46	71	96	120	143	251	344	425	496	558	611	658
105	1029	48	74	100	126	150	263	360	444	516	579	634	681
110	1036	49	77	105	131	157	275	375	462	536	600	655	702
115	1043	51	80	109	137	164	286	391	480	556	620	676	723
120	1049	52	83	113	143	171	298	406	497	575	640	695	742
125	1055	54	86	118	148	178	310	421	514	593	659	715	761
130	1061	55	89	122	154	184	321	436	531	611	677	733	779
135	1067	57	92	127	160	191	333	450	548	628	695	751	797
140	1072	58	95	131	165	198	344	465	564	645	712	768	814
145	1077	60	98	135	171	205	356	479	580	662	729	784	829
150	1082	62	102	140	177	212	367	493	595	678	745	800	845
155	1087	63	105	144	182	218	378	507	610	694	761	815	859
160	1092	65	108	149	188	225	389	520	625	709	776	830	874
165	1097	66	111	153	193	232	400	534	640	724	791	844	887
170	1101	68	114	157	199	239	411	547	654	738	805	858	900
175	1106	70	117	162	205	246	422	560	668	752	819	871	912
180	1110	71	120	166	210	252	433	573	681	766	832	884	924

表C.2-7  $d_i/\lambda_i$  为0.5时标准升温条件下有保护层钢构件的升温 (°C)

$d_i/\lambda_i=0.5(\text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W})$		截面形状系数 $F_i/V(\text{m}^{-1})$											
时间 (min)	空气温度 (°C)	10	20	30	40	50	100	150	200	250	300	350	400
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
5	576	21	21	22	22	23	25	28	30	33	35	38	40
10	678	21	23	24	25	26	33	39	45	51	57	63	69
15	739	22	24	26	28	31	41	51	61	71	81	90	100
20	781	23	26	29	32	35	50	64	78	92	106	119	132
25	815	24	28	32	36	40	59	78	96	114	131	148	164
30	842	25	30	35	40	45	69	92	114	136	157	177	197
35	865	26	32	38	44	50	78	106	132	158	182	206	229
40	885	27	34	41	48	55	88	120	151	180	208	235	260
45	902	28	36	44	52	60	98	134	169	202	233	263	291
50	918	29	38	47	56	65	108	149	187	224	258	291	321
55	932	30	41	51	61	71	118	163	205	245	283	318	351
60	945	32	43	54	65	76	129	178	224	267	307	344	380
65	957	33	45	57	70	82	139	192	242	288	331	371	408
70	968	34	47	61	74	87	149	206	259	309	354	396	435
75	979	35	50	64	78	93	159	221	277	329	377	421	461
80	988	36	52	68	83	98	169	235	295	349	399	445	487
85	997	37	54	71	88	104	180	249	312	369	421	469	512
90	1006	39	57	75	92	109	190	263	329	389	443	492	536
95	1014	40	59	78	97	115	200	277	346	408	464	514	559
100	1022	41	62	82	101	120	210	291	363	427	484	536	582
105	1029	42	64	85	106	126	221	304	379	445	504	557	604
110	1036	43	66	89	111	132	231	318	395	464	524	577	625
115	1043	45	69	92	115	137	241	331	411	481	543	597	645
120	1049	46	71	96	120	143	251	345	427	499	562	617	665
125	1055	47	74	99	124	149	261	358	443	516	580	635	684
130	1061	49	76	103	129	154	271	371	458	533	598	654	702
135	1067	50	79	107	134	160	281	384	473	549	615	671	720
140	1072	51	81	110	139	166	290	397	488	565	632	689	737
145	1077	52	84	114	143	172	300	410	502	581	648	705	754
150	1082	54	86	118	148	177	310	422	517	597	664	722	770
155	1087	55	89	121	153	183	320	434	531	612	680	737	785
160	1092	56	91	125	157	189	329	447	545	627	695	752	800
165	1097	58	94	128	162	194	339	459	558	641	710	767	815
170	1101	59	96	132	167	200	348	471	572	655	724	782	829
175	1106	60	99	136	171	206	358	483	585	669	739	796	843
180	1110	61	101	139	176	211	367	494	598	683	752	809	856

## 附录D混凝土抗火承载力简化计算方法

### D.1 500℃等温线法

#### D.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D-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，最小截面宽度取决于火灾荷载强度。

表D-1 最小截面宽度

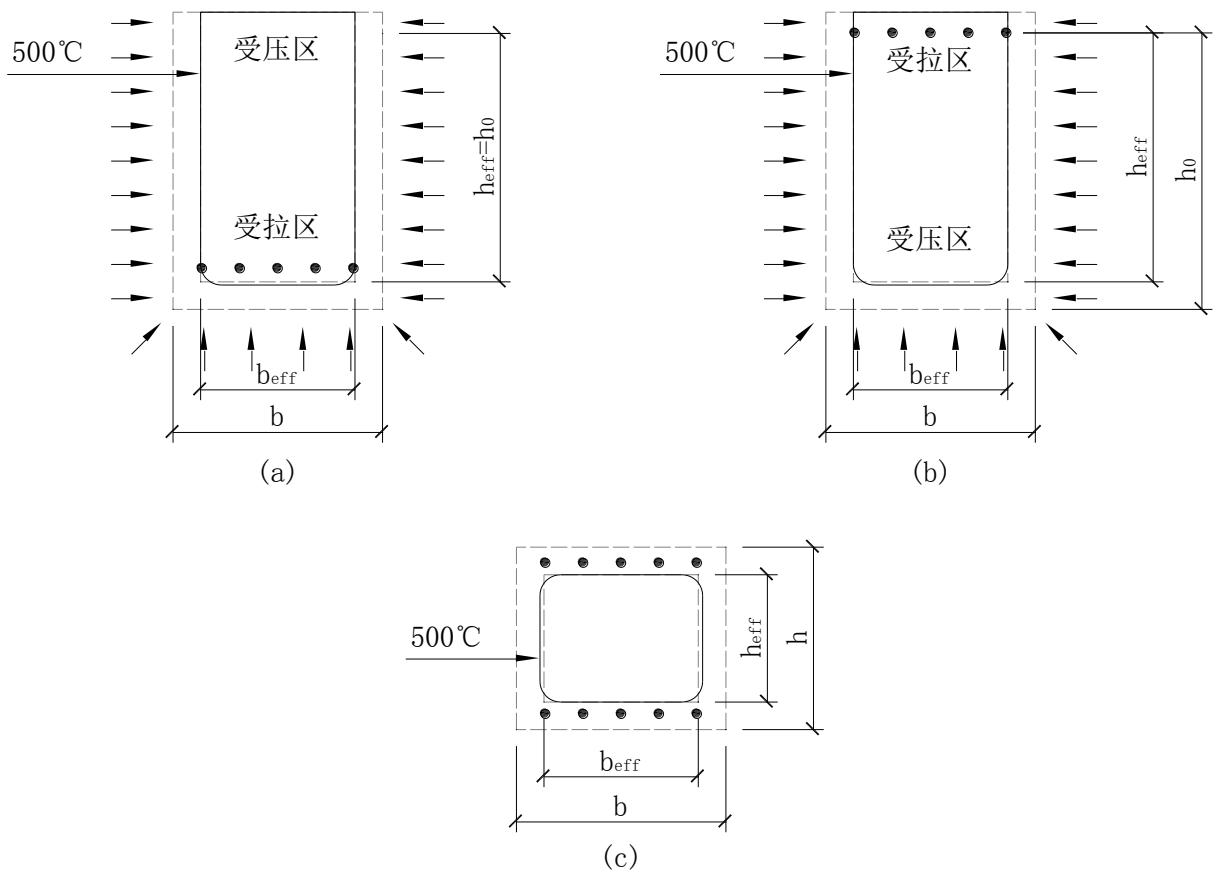
最小截面宽度取决于构件耐火极限				
耐火极限 (min)	60	90	120	180
最小截面宽度 (mm)	90	120	160	200
最小截面宽度取决于火灾荷载强度				
火灾荷载强度 (MJ/m <sup>2</sup> )	200	300	400	600
800				
最小截面宽度 (mm)	100	140	160	200
240				

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。损伤层厚度取为截面受压区500℃等温线上个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，而平均温度不大于500℃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。

#### D.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以采用下述步骤：

- 1 确定截面 $500^{\circ}\text{C}$ 等温线的位置；
- 2 去掉截面上温度大于 $500^{\circ}\text{C}$ 的部分，得到截面的有效宽度 $b_{eff}$ 和有效高度 $h_{eff}$ （图D-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位置由计算获得的构件截面温度场曲线获得。对于落后的有效截面之外的部分钢筋（图D-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（5.4.3）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。



图D-1 混凝土梁和柱缩减后的有效截面

(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

D.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  $a'_s$ ：

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

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

式中  $a_s$ ， $a'_s$ ——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 (D-3)、(D-4) 就算：

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

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

$f_{yj}(T_i)$ ， $f'_{yj}(T_i)$ ——分别为温度  $T_i$  是第j层第i跟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  $a_s$ ， $a'_s$ ：

$$a_s = \frac{\sum a_{si} f_{yi}(T_i) A_{si}}{\sum f_{yi}(T_i) A_{si}} \quad (\text{D-5})$$

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

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。

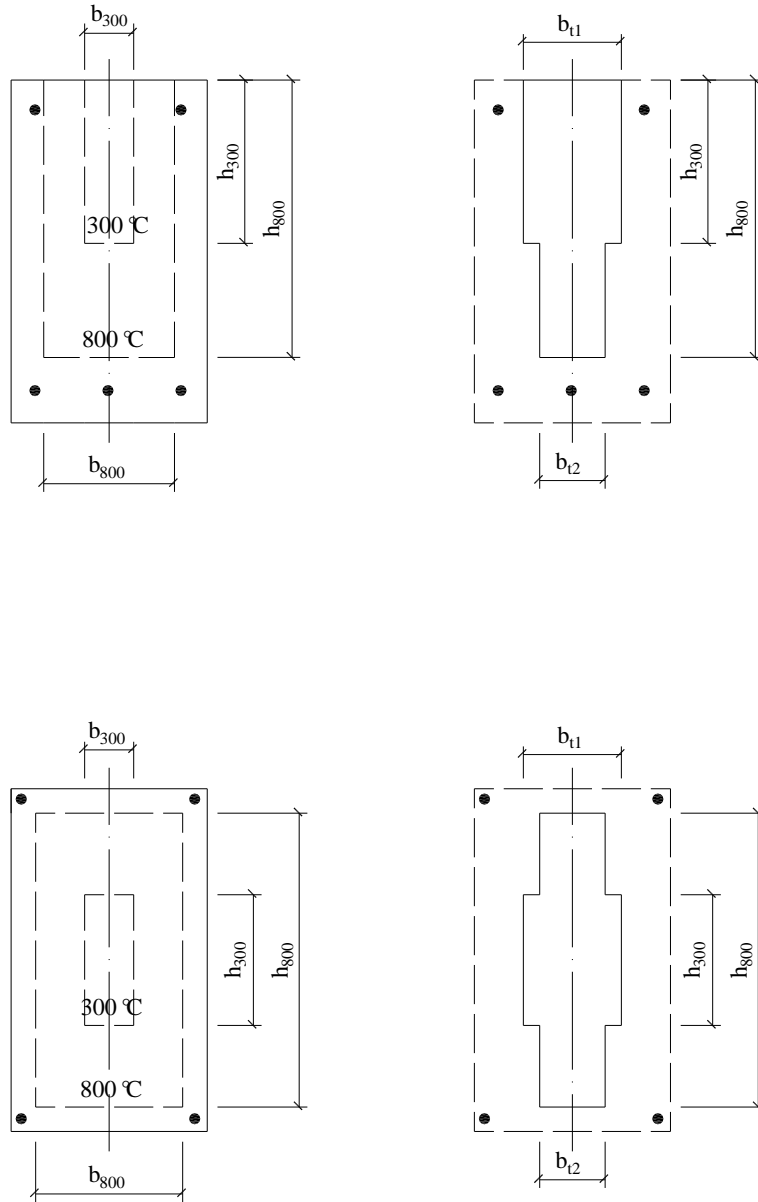
## D.2 300℃和800℃等温线法

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℃等温线近视化整为矩形；
- 3) 保留 300℃等温线以内的全部面积，忽略 800℃等温线外的全部面积，300℃和 800℃等温线之间的部分宽度减半。图 D-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 300℃等温线对应的近视矩形的宽度和高度， $b_{800}$  和  $h_{800}$  分别为与 800℃等温线对应的近视矩形的宽度和高度，

$$b_{T1} = b_{300} + 0.5(b_{800} - b_{300}), b_{T2} = 0.5b_{800}。$$

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给予考虑，钢筋强度按所在位置处的温度由式 (5.4.3) 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D-2 有效截面的确定

(a)三面受火 (b)四面受火

### D.3 条带法

D.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。

D. 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D-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D-3(a)和(b)为基本参考图

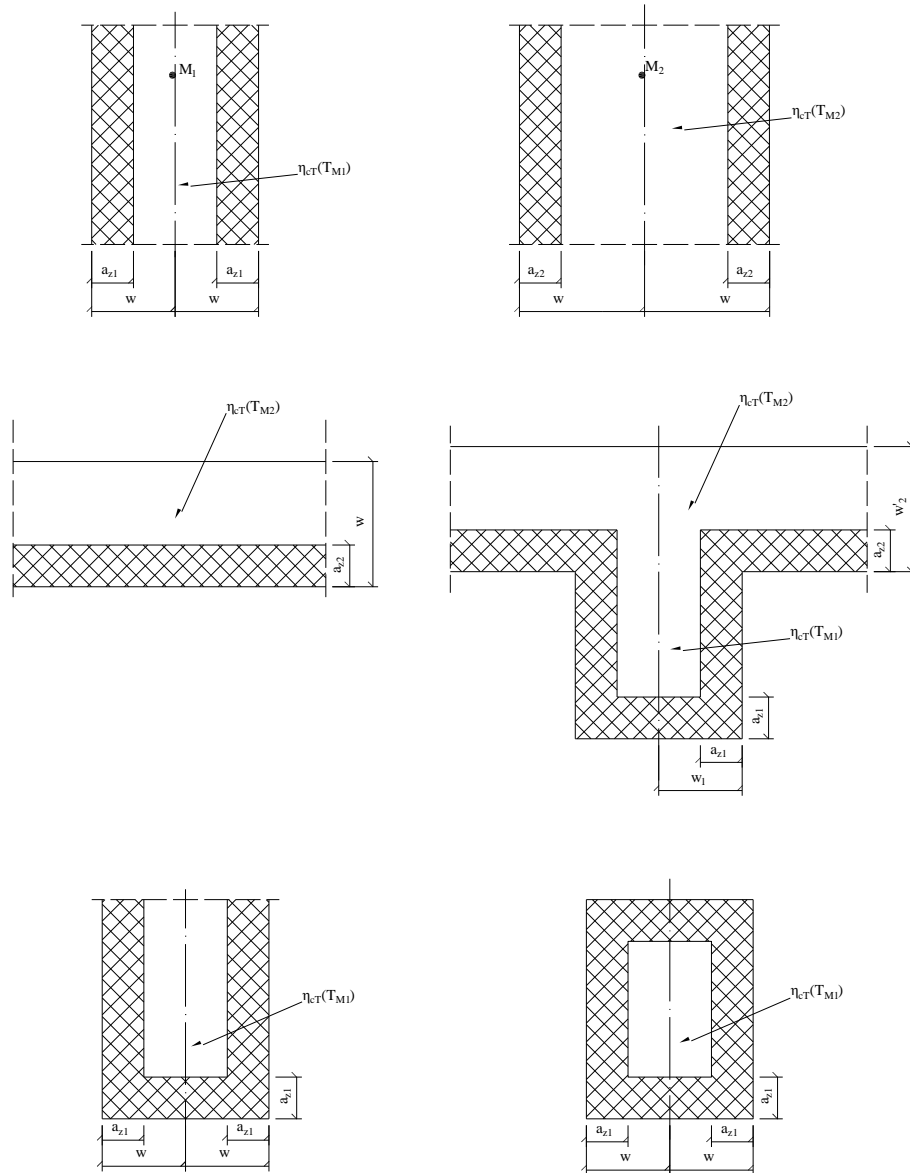


形。

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

对于图D-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D-3（a）和D-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，底部和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D-3（d）、D-3（e）、D-3（f）。



图D-3 受火面的损伤层厚度和缩减后的有效截面

(a)两面受火墙(b)两面受火厚墙(c)单面受火板

(d)三面受火梁(e)三面受火的墙端(f)四面受火柱

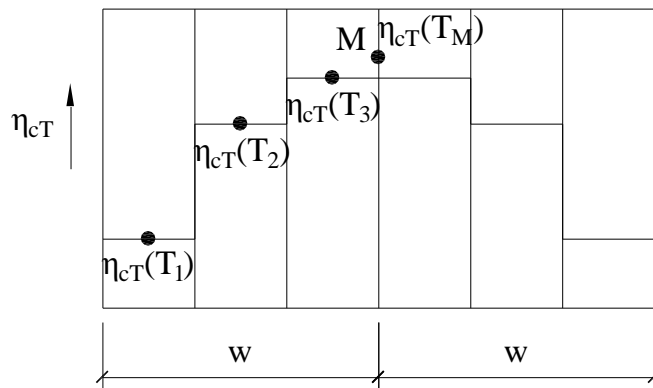
D.3.3相对两面受火墙的两面受火损伤层厚度可用下列方法进行估算：

1. 在厚度方向上将墙评分为两半，每一半划分成  $n$  个 ( $n \geq 3$ ) 等宽条带 (图 D-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 5.1.6 条和 5.2.3 条计算条带中线上的混凝土抗压强度折减系数  $\eta_{cT}(T_i)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )。
3. 采用下式计算混凝土平均抗压强度折减系数  $\overline{\eta_{cT}}$ ：

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

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、三面受火柱或四面受火柱的1/2截面宽度。



图D-4 两面受火墙的条带划分

4. 图 D-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：

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

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

图D-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:

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

D.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。假定有效截面内个点的混凝土抗压强度相等, 且均等于平分线上M点 (图D-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。

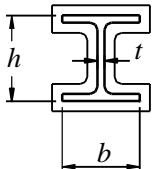
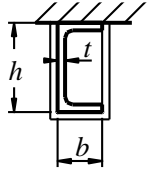
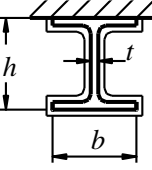
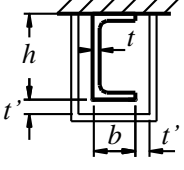
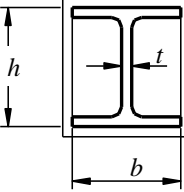
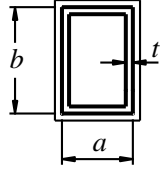
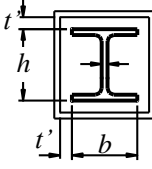
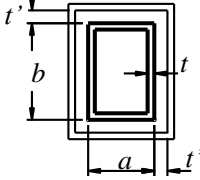
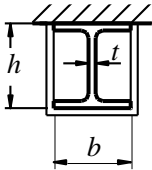
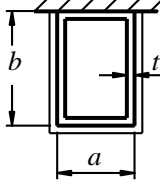
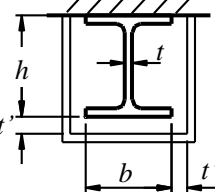
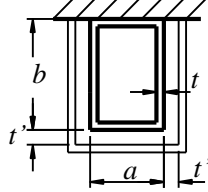
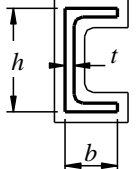
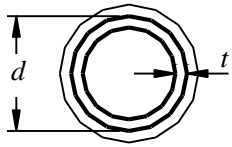
## 附录E精细计算方法

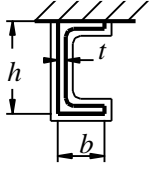
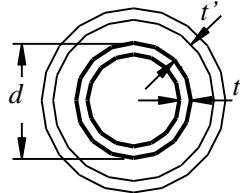
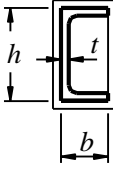
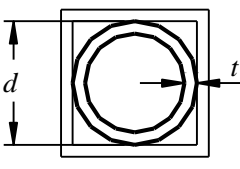
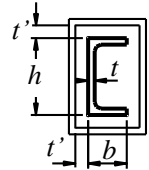
对于按照第7.4条进行分析的建筑物, 在进行整体火灾分析时需考虑是内火灾的实际升温曲线、高温下材料性能的逐渐劣化, 以及构件热变形和相邻构件之间相互约束的影响。

高温下钢材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, 除应力引起的应变之外, 还有热膨胀应变、钢材的高温瞬时蠕变、混凝土的瞬态热应变和短期高温徐变。随着温度的升高, 钢材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着升温时间的变化情况, 再根据第7.1条判断构件或结构的耐火设计是否满足要求。

附录F 有保护层钢构件的截面系数

截面形状	形状系数 $F_i/V$	备注	截面形状	形状系数 $F_i/V$	备注
	$\frac{2h+4b-2t}{A}$			$\frac{2h+b}{A}$	
	$\frac{2h+3b-2t}{A}$			$\frac{2h+b}{A}$	应用限制 $t \leq \frac{h}{4}$
	$\frac{2(h+b)}{A}$			$\frac{a+b}{t(a+b-2t)}$	
	$\frac{2(h+b)}{A}$	应用限制 $t \leq \frac{h}{4}$		$\frac{a+b}{t(a+b-2t)}$	应用限制 $t \leq \frac{b}{4}$
	$\frac{2h+b}{A}$			$\frac{a+b/2}{t(a+b-2t)}$	
	$\frac{2h+b}{A}$	应用限制 $t \leq \frac{h}{4}$		$\frac{a+b/2}{t(a+b-2t)}$	应用限制 $t \leq \frac{b}{4}$
	$\frac{2h+4b-2t}{A}$			$\frac{d}{t \cdot (d-t)}$	

	$\frac{2h+3b-2t}{A}$			$\frac{d}{t \cdot (d-t)}$	应用限制 $t \leq \frac{d}{4}$
	$\frac{2(h+b)}{A}$			$\frac{d}{t \cdot (d-t)}$	
	$\frac{2(h+b)}{A}$	应用限制 $t \leq \frac{h}{4}$			

注：表中A为构件截面积

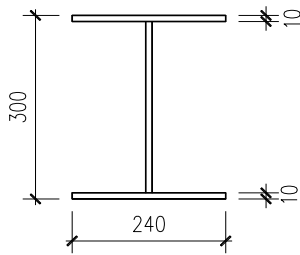
## 附录G非膨胀型防火涂料和防火板等效热传导系数测试方法

G.1 现场施工所采用的防火材料的热传导系数可按下列步骤进行检测：

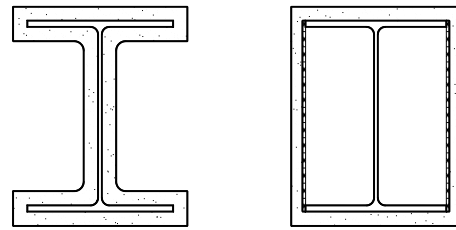
1 预制图G.1-1所示截面的钢试件，长度为1.0m。

2 在钢结构防火工程的施工现场，采用现场施工的防火材料对钢试件进行防火保护（图G.1-2），厚度取为20mm。试件两端用相同防火材料封堵。

3 对钢试件进行标准火灾升温试验，量测1.5h时刻试件在图G.1-3所示测点处的温度。

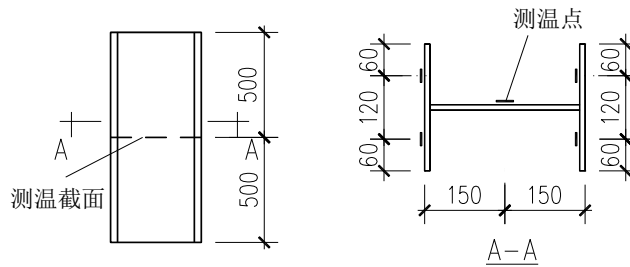


图G.1-1 钢试件截面



(a) 非膨胀型涂料(b) 防火板

图G.1-2 防火保护试件截面



图G.1-3 试件上温度测点布置

4 计算钢试件的预测温度。

对于采用非膨胀防火涂料保护的试件：

$$T_s = (\sqrt{0.044 + 0.403\lambda_1} - 0.2) \times 5400 + T_{s0} \quad (\text{G.1-1})$$

对于采用防火板保护的试件：

$$T_s = (\sqrt{0.044 + 0.286\lambda_1} - 0.2) \times 5400 + T_{s0} \quad (\text{G.1-2})$$

式中  $T_{s0}$  —— 试验前试件的初始温度（℃）；

$\lambda_1$ ——防火材料的热传导系数 [W/(m·°C)]。

5 当各测点的最高温度  $T_{\max}$  和平均温度  $T_0$  满足下式时

$$T_{\max} \leq 1.15T_s \quad (\text{G.1-3})$$

$$T_0 \leq T_s \quad (\text{G.1-4})$$

可判定施工所用材料的热传导系数与产品标称值相符。否则，不相符。

G.2 非膨胀型防火涂料和防火板的等效热传导系数，可按下列步骤进行测定：

1 预制图G.1-1所示截面的钢试件，长度为1m。

2 采用待测防火材料对钢试件进行防火保护（图G.1-2），厚度取20mm。试件两端用相同防火材料封堵。

3 对钢试件进行标准火灾升温试验，量测1.5h时刻试件在图G.1-3所示测点处的温度。

4 计算各测点的平均温度  $T_0$ 。

5 计算防火材料的等效热传导系数  $\lambda_1$ 。

1) 对于非膨胀型防火涂料：

$$\lambda_1 = 2.48 \left[ \left( \frac{T_0 - T_{s0}}{5400} + 0.2 \right)^2 - 0.109 \right] \quad (\text{G.2-1})$$

2) 对于防火板：

$$\lambda_1 = 3.479 \left[ \left( \frac{T_0 - T_{s0}}{5400} + 0.2 \right)^2 - 0.154 \right] \quad (\text{G.2-2})$$

中国工程建设标准化协会标准

# 地下公共建筑结构抗火性能设计标准

## 条文说明



## 目录

1	总则.....	75
2	术语和符号.....	75
3	地下建筑性能化抗火设计的基本要求.....	75
3.1	一般规定 .....	75
3.2	建筑抗火设防要求 .....	75
3.3	火灾场景 .....	76
3.4	结构抗火设计原则 .....	77
3.5	防火措施与隔热保护.....	77
4	火灾场景分析.....	78
4.1	一般规定.....	78
4.2	火灾场景设定.....	78
4.3	火灾场景模拟成果.....	79
5	结构材料与防火材料.....	80
5.1	普通混凝土.....	80
5.2	高强混凝土.....	82
5.3	其它类型的混凝土.....	83
5.4	钢材.....	83
5.5	防火板.....	83
5.6	防火涂料.....	84
5.7	其它防火隔热材料.....	87
6	火灾作用效应.....	89
6.1	构件升温计算.....	89
6.2	火灾下结构和构件内力和变形计算.....	91
7	抗火验算.....	92
7.1	一般规定 .....	92
7.2	抗火承载力极限验算.....	92
7.3	隔热极限状态验算.....	94
8	防火保护措施.....	94

8.1 保护措施及其选用原则.....	94
8.2 防火保护构造.....	94

# 1 总则

## 2 术语和符号

### 3 地下建筑性能化抗火设计的基本要求

#### 3.1 一般规定

3.1.1 地下公共建筑应确定其抗火设防类别，抗火类别的划分应根据下列因素综合分析确定：

- 1 建筑物的建筑规模
- 2 建筑在火灾时破坏造成的人员伤亡、直接和间接经济损失及社会影响大小；
- 3 建筑物使用功能失效后，对全局的影响范围大小、灾后恢复的难易程度；
- 4 不同行业的相同建筑，当火灾危险性或火灾破坏所产生的后果和影响不同时，其抗火设防类别可不相同。

3.1.2 本条款主要确定发生火灾的危险性和危害性。

3.1.4 综合考虑规模和使用功能的重要性、发生火灾的危险性和危害性确定地下结构的抗火性态水准。

#### 3.2 建筑抗火设防要求

##### 3.2.1

- 1 保障建筑物不会因火灾而对运营、生产作业产生较大损失，控制火灾规模；
- 2 保障建筑物内使用人员的生命安全以及救援人员的人身安全。

3.2.4 针对几种具有代表性的地下建筑给出防火设防类的划分。不同的地下结构

根据其不同运营特点使用不同的控制指标同时结合已有的相关规范进行分类。例如停车场的控制指标为停车位的数量。具体讨论见, 崔彦轩,袁勇,邱俊男,王奕然. 试论地下公共建筑的火灾设防等级[J]. 城市建筑,2014,04:207-209.

3.2.5若存在合建的地面建筑, 应充分考虑地下与地面建筑火灾发生时产生的相互影响。主要包含两个方面1) 火灾的向上蔓延问题, 2) 对上部建筑的运营产生的影响。

### 3.3 火灾场景

#### 3.3.1 名义升温曲线

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。

1) ISO-834标准升温曲线是《建筑构件耐火试验方法(第一部分)》GB/T 9978.1-2008所规定的升温曲线, 也是国家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。其中的对流换热系数参考(Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General rules - Actions on structures exposed to fire, EN 1991-1-2, 2002) 3.2.1条。

2) HC曲线, 是在开放环境下碳氢化合物燃烧的特征曲线, 燃料可以迅速达到峰值温度, 然后保持1100℃不变。该曲线适用于小规模汽油燃料的火灾。计算公式以及对流换热系数参考(Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General rules - Actions on structures exposed to fire, EN 1991-1-2, 2002) 3.2.3条。

3) RABT升温曲线是根据在德国一系列试验室研究成果发展的, 这种曲线模拟在5分钟内温度快速升到1200℃, 这种曲线高温持续时间比其它曲线短。按照《建筑设计防火规范》GB50016—2006附录A给出RABT升温曲线。

3.3.2 热释放速率模型可按下式确定为四种模型:  $Q$ 为火灾热释放速率, 单位kw;  $\alpha$ 为火灾发展系数, 单位kw/s<sup>2</sup>,  $t$ 为火灾发展时间, 单位s。  $\alpha$ 分别可取

0.1876,0.0469,0.0117和0.0029对应超快速、快速、中速、慢速。

$$Q=\alpha \cdot t^2$$

3.3.3不同设防分类的地下公共建筑，选择抗火设计方法也是不同的。规范条例即从性能化设计角度出发，针对不同的建筑，选择足够准确且设计合理的方法。

3.3.4在空气升温曲线的温度-时间(T-t)坐标图上，若b升温曲线在a升温曲线内部，则可以认为a升温曲线较b升温曲线更“严厉”。

### 3.4 结构抗火设计原则

3.4.1由材料性能决定，混凝土结构较钢结构等其它结构具有更好的抗火性能。

《建筑设计防火规范》（GB50016）5.1.8条规定“地下结构的耐火等级应为一級”，表3.4.1依据《建筑设计防火规范》（GB50016）表5.1.1制定。

3.4.2火灾下结构的承载功能和正常条件下的结构是一致的，均为安全地承受可能的荷载和作用。因此，结构抗火承载力极限状态与正常条件下的承载力极限状态相同，即达到这些极限状态结构就会破坏（或倒塌）而不能继续承载。

3.4.3结构的隔热性能指的是阻止火灾透过结构传递到相邻房间的能力。与正常条件下不同，为阻止或减缓火灾蔓延，在火灾下部分结构需要具有隔火功能，例如防火分区边界上的中隔墙。

3.4.4 同一建筑不同结构构件，所处的火灾场景（可燃物数量、通风条件等）可能不同，相应的结构抗火等级不同。

### 3.5 防火措施与隔热保护

## 4 火灾场景分析

### 4.1 一般规定

4.1.1火灾场景分析是性能化设计的基础，通过火灾场景的设定，利用模拟等方法分析火灾下空间的特性，为结构特性和抗火分析提供重要依据。

4.1.2地下公共建筑的火灾场景分析通常方法是数值模拟法。目前，国际上流行的火灾数值模拟方法有网络模拟，区域模拟，场模拟三种。其中FDS大涡模拟作为场模拟的一种方法应用较为广泛，FDS模拟时通常根据空间真实的火灾场景进行设定。

4.1.3火灾场景设定中关键是确定火源的位置，强度和时间等特性，因为对于不同的火源特性，其火灾场景往往有很大区别，即使同一建筑，也会因为火源特性等条件的不同而存在不同的火灾场景。

4.1.4 此条主要是针对3.2提出的重要设防类建筑，在考虑这类建筑的火灾场景时，应对真实环境下的通风、喷淋等条件进行分析以做到模拟的准确性。

### 4.2 火灾场景设定

4.2.1地铁站电气，电线繁多的区域通常是火灾发生频繁的地点，因此对建筑物进行火灾场景模拟时，此类地点需做研究。

4.2.2对于大的火灾场景，必须考虑火灾发生时人员的安全，因此诸如出入口、楼梯口等人流通行量大的地点也需进行模拟分析。

4.2.4引发火灾的可燃物种类众多，模拟时通常不能用4.2.3条的燃烧物热值进行设计。2MW是对火源热释放速率进行研究后得出的“小火”时的设计值。而现在发生较多人为纵火火灾事故，其火源强度最高可以达到7.5MW。

4.2.5通过进行普通列车燃烧测定，此为建议值。

4.2.6 6分钟为地铁站发生火灾后人员规定的逃生时间；鉴于地铁站结构的

耐火等级， I 类建筑结构受火时间至少为2小时。

4.2.7 不宜大于10m/s主要是出于建筑内人员的正常感受及设备正常运行考虑。

### 4.3 火灾场景模拟成果

4.3.1 通过模拟得到火源附近的温度，各物质组分浓度（氧气、一氧化碳、二氧化碳），有助于分析火灾的规模以及发展规律；而对于人员疏散所必经的地点以及人流通过量大的区域，模拟烟气分布情况和能见度可对疏散的分析有重要作用。

4.3.2 火灾发生的最初6分钟是《地铁设计规范》规定的人员逃生的时间，保证这期间能见度不小于10m是疏散的根本保证；而4.3.4的空间平均温度不超过60摄氏度也是出于人体所能忍受的温度决定的。

4.3.3 火灾模拟得到的气体流速以及通风排烟速度必须满足人员行走，逃生的要求以及应急等设备正常工作。

## 5 结构材料与防火材料

### 5.1 普通混凝土

5.1.1式(5.1.1)是在(Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, EN 1992-1-2, 2004)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。本公式中没有考虑不同骨料对于热传导系数的影响,在过镇海主编的《钢筋混凝土的高温性能极其计算》(清华大学出版社,2003)考虑了骨料的影响,公式如下。

1) 硅质骨料混凝土:

$$\lambda_c = 2 - 0.24 \frac{T}{120} + 0.012 \left( \frac{T}{120} \right)^2 \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C}$$

2) 钙质骨料混凝土:

$$\lambda_c = 1.6 - 0.16 \frac{T}{120} + 0.008 \left( \frac{T}{120} \right)^2 \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C}$$

式中:  $\lambda_c$ ——温度为 $T$ 时混凝土的热传导系数 [W/(m·°C)];

$T_c$ ——混凝土的温度 (°C)。

5.1.2 比热的取值是按照(Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, EN 1992-1-2, 2004)第3.3.2条。虽然混凝土含水量在温度100~200°C范围内对比热容有较大影响,但对结构的抗火行为影响有限,为应用方便未考虑含水量对比热的影响。过镇海给出的比热公式如下(《钢筋混凝土的高温性能极其计算》(清华大学出版社,2003)):

$$c_c = 900 + 80 \frac{T_c}{120} - 4 \left( \frac{T_c}{120} \right)^2 \quad 20^\circ\text{C} \leq T_c \leq 1200^\circ\text{C}$$

式中:  $c_c$ ——温度为 $T$ 时混凝土的比热容 [J/(kg·°C)]。

$T_c$ ——混凝土的温度 (°C)。

5.1.3随温度升高混凝土的密度有所减小,这主要是水分高温蒸发所致。在结构



的温度场分析时，为了简化计算，混凝土的密度常取为与温度无关的常值（ $2200 \text{ kg/m}^3 \sim 2400 \text{ kg/m}^3$ ）。对于更精细的计算可参考欧洲规范（Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, EN 1992-1-2, 2004）给出的密度计算该公式，如下式。

$$\begin{aligned}\rho_c(T_c) &= \rho_c & 20^\circ\text{C} \leq T_c \leq 115^\circ\text{C} \\ \rho_c(T_c) &= \rho_c \cdot (1 - 0.02(T_c - 115)/85) & 115^\circ\text{C} < T_c \leq 200^\circ\text{C} \\ \rho_c(T_c) &= \rho_c \cdot (0.98 - 0.03(T_c - 200)/200) & 200^\circ\text{C} < T_c \leq 400^\circ\text{C} \\ \rho_c(T_c) &= \rho_c \cdot (0.95 - 0.07(T_c - 400)/800) & 400^\circ\text{C} < T_c \leq 1200^\circ\text{C}\end{aligned}$$

5.1.5热膨胀系数与骨料类型密切相关，计算公式参考欧洲规范（Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, EN 1992-1-2, 2004）第3.3.1条制定。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。

5.1.6国内外的试验表明，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。参考广东省标准DBJ/T 15-81-2011《建筑混凝土结构耐火设计技术规程》制定了 $20^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C}$ 部分；对于 $1000^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}$ ，欧洲规范（Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, EN 1992-1-2, 2004）认为混凝土仍有很少的强度，规范中考虑了公式的连续性，增加了 $1000^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}$ 的部分，这样的取值是偏于保守的。

5.1.7普通混凝土的抗拉强度随温度升高单调下降。参考广东省标准DBJ/T 15-81-2011《建筑混凝土结构耐火设计技术规程》制定了 $20^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C}$ 部分；考虑了公式的连续性，增加了 $1000^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}$ 的部分。欧洲规范（Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, EN 1992-1-2, 2004）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。

5.1.8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。参考广东省标准DBJ/T 15-81-2011《建筑混凝土结构耐火设计技术规程》制定了 $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1000^{\circ}\text{C}$ 部分；考虑了公式的连续性，增加了 $1000^{\circ}\text{C} < T \leq 1200^{\circ}\text{C}$ 的部分。

5.1.9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，峰值点明显下降和右移。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-应变十分接近，且与常温时的无量纲应力-应变曲线相似。参考广东省标准DBJ/T 15-81-2011《建筑混凝土结构耐火设计技术规程》制定了 $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1000^{\circ}\text{C}$ 部分；考虑了公式的连续性，增加了 $1000^{\circ}\text{C} < T \leq 1200^{\circ}\text{C}$ 的部分。对于 $1000^{\circ}\text{C} < T \leq 1200^{\circ}\text{C}$ 部分，由于混凝土基本丧失了力学性能，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。

## 5.2 高强混凝土

5.2.1 对于高强混凝土和普通强度混凝土的热工性能的区别，目前仍存在争议，试验研究结果存在矛盾，但总体相差不大。

5.2.2广东省标准DBJ/T 15-81-2011《建筑混凝土结构耐火设计技术规程》中高强混凝土的导热系数、比热容、密度、热膨胀应变与普通混凝土取值相同。

5.2.3高温下高强混凝土的抗压强度，仍与温度和荷载密切相关。目前虽然进行了大量的试验研究，但由于试验方法条件的不同，试验数据并没有很大的代表性，仍没有一致的有效结论。Phan进行了大量的试验研究(LT Phan, TP McAllister, JL Gross, MJ Hurley. Best practice guidelines for structural fire resistance design of concrete and steel buildings[M]. National Institute of

Standards and Technology, 2010.)，本规范采用了Phan的强度计算公式。

### 5.3 其它类型的混凝土

## 5.4 钢材

5.4.1 高温下钢材的热膨胀系数、导热系数和比热容等随温度不同会有一些的变化，但为应用方便，本规范取用了这些参数在高温下的平均值。

5.4.2-5.4.3 普通结构钢的屈服强度和弹性模量随温度升高而降低，且其屈服台阶变得越来越小。在温度超过300°C以后，已无明显的屈服极限和屈服平台，因此，需要指定一个强度作为钢材的名义屈服强度。通常以一定量的塑性残余应变所对应的应力作为钢材的名义屈服强度。在高温下同济大学对16Mn钢与SM41钢进行了较为系统的高温材性试验，量测了0.2%、0.5%、1.0%等三个名义应变水平的高温屈服强度。根据以上试验数据，并参考欧洲和英国等国家的规范，确定了本规范中高温下普通结构钢屈服强度和弹性模量的拟合公式。

## 5.5 防火板

5.5.1 根据密度可将防火板分为低密度防火板、中密度防火板和高密度防火板；根据使用厚度可将防火板分为防火薄板和防火厚板两大类，见表C5.5-1。常用防火板的主要技术性能参数见表C5.5-2。

表C5.5-1 防火板分类及性能特点

性能特点 分类		密度(kg/m <sup>3</sup> )	厚度(mm)	抗折强度(MPa)	导热系数 (W/(m·°C))
厚 度	防火薄板	400~1800	5~20	—	0.16~0.35
	防火厚板	300~500	20~50	—	0.05~0.23
密 度	低密度防火板	<450	20~50	0.8~2.0	—
	中密度防火板	450~800	20~30	1.5~10	—
	高密度防火板	>800	9~20	>10	—

表C5.5-2 常用防火板的主要技术性能参数

防火板类型	常用外形尺寸 (长×宽×厚)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	最高使用 温度(°C)	导热系数 (W/(m·°C))	执行标准
纸面石膏板	3600×1200×9~18	800	600	0.19左右	GB/T9775
纤维增强水泥板	2800×1200×4~8	1700	600	0.35左右	JC412-91
纤维增强硅酸钙板	3000×1200×5~20	1000	600	≤0.28	JC/T564
蛭石防火板	1000×610×20~65	430	1000	0.11左右	—
硅酸钙防火板	2440×1220×12~50	400	1100	≤0.08	—
玻镁平板	2500×1250×10~15	1200~1500	600	≤0.29	JC688

防火薄板使用厚度大多在6-15mm之间，密度在800-1800kg/m<sup>3</sup>之间，主要用作轻钢龙骨隔墙的面板、吊顶板，以及钢梁、钢柱经非膨胀型防火涂料涂覆后的装饰面板。这类板包括各种短纤维增强水泥压力板、纤维增强普通硅酸盐防火板以及各种玻璃布增强无机板。

防火厚板的特点是密度小、导热系数低、耐高温（使用温度可达1000<sup>0</sup>C以上），其使用厚度可按耐火极限需要确定，大致在10-50mm之间。防火厚板表面光滑平整、耐火性能优良，用它做防火材料不需再用防火涂料，可以完全干作业。

## 5.6 防火涂料

5.6.1 钢结构防火涂料是指施涂于钢结构表面，能形成耐火隔热保护层以提高钢结构耐火性能的一类防火材料，根据高温下钢结构防火涂层遇火变化的情况可分为膨胀型和非膨胀型两类，其分类依据见表C5.6.1.

表C5.6.1 防火涂料的分类

类型	代号	涂层特性	主要成份
膨胀型	B	遇火膨胀，形成多孔碳化层，涂层一般小于7毫米	有机树脂为基料，还有发泡剂、阻燃剂、成炭剂等。
非膨胀型	H	遇火不膨胀，自身有良好的隔	无机绝热材料（如膨胀蛭石，飘珠、

		热性，涂层8~50毫米	矿物纤维)为主，还有无机粘结剂等。
--	--	-------------	-------------------

注：膨胀型防火涂料又称薄型防火涂料，这种涂料具有较好的装饰性。非膨胀型防火涂料又称厚型防火涂料、隔热型防火涂料。

国内钢结构防火涂料生产和应用近几年发展较快，据不完全统计，已有生产、施工、科研单位近百家，年销售量过万吨，钢结构防火工程年施工面积超过百万平方米，已成为一类重要消防安全材料。

为促进钢结构防火涂料产品生产和应用的标准化，国家从1990年以来先后颁布实施了《钢结构防火涂料应用技术规范》CECS24:90和《钢结构防火涂料通用技术条件》GB14807-1994，这两个标准对促进钢结构防火涂料的开发、应用和质量检测监督发挥了显著作用。《钢结构防火涂料》GB14807-2002在《钢结构防火涂料通用技术条件》GB14807-1994的基础上，对室外涂料及超薄型涂料的试验方法和性能要求作出了专门规定，并对原标准内容做了部分调整修订，使标准得到充实和完善。

近几年来国内钢结构防火涂料应用中出现了一些新的情况，原来标准已不能全面反映这些情况，为此，在本规范中对该产品要求和使用条件作了一些补充，规定更加明确、具体。

5.6.2通常将能适合于建筑物室外或露天工程中长期使用的防火涂料称之为室外用防火涂料，它满足现行国家标准《钢结构防火涂料》GB14907中的室外钢结构防火涂料的技术条件。需注意，不能将仅适用于室内钢结构防火保护的涂料用于室外。

防火涂料的导热系数是衡量其隔热性能的一个重要参数，由于一般防火涂料的导热系数随温度变化而有一定的变化，本规范明确规定厂家宜提供火灾中最常遇的500<sup>0</sup>C的导热系数值。如果厂家无条件直接测量防火涂料的导热系数，可按附录G提供的方法测量等效导热系数。

5.6.3根据国内外有关资料报道及有关机构的试验和统计数字表明，钢结构建筑的耐火性能较砖石结构和钢筋混凝土结构差。钢材的机械强度随温度的升高而降低，在500℃左右，其强度下降到40%~50%，钢材的力学性能，诸如屈服

点、抗压强度、弹性模量以及荷载能力等都迅速下降，很快失去支撑能力，导致建筑物垮塌。因此，火灾条件下必须对钢结构进行保护。

钢结构防火涂料一般分为三类：超薄型(<3mm)、薄型(3~7mm)及厚型(>7mm)。超薄型或薄型防火涂料的防火隔热原理是防火涂料层在受火时膨胀发泡，形成泡沫，泡沫层不仅隔绝了氧气，而且因为其质地疏松而具有良好的隔热性能，可延滞热量传向被保护基材的速度；厚型防火涂料的防火隔热原理是防火涂料受火时涂层基本上不发生体积变化，但涂层热导率很低，延滞了热量传向被保基材的速度，对构件起屏障和防止热辐射作用，避免了火焰和高温直接进攻构件。另外该类防火涂料受火时涂层不发生体积变化形成釉状保护层，它能起隔绝氧气的作用，使氧气不能与被保护的易燃基材接触，从而避免或降低燃烧反应。厚型防火涂料一般涂层较厚才能达到一定的防火隔热性能要求。

混凝土属于不燃体，但在火灾高温下，其强度损失很快。预应力混凝土楼板的耐火极限据实验仅为0.5h。混凝土中的胶体、结晶体在火灾高温条件下均会发生脱水、分解反应，使水泥结石中的胶体、结晶体遭到破坏，强度随之下降。水化硅酸三钙在160℃开始脱水；其他水化物则在250~300℃开始脱水，400~600℃强度明显下降；氢氧化钙在574℃将脱水成氧化钙。混凝土中的粗骨料(卵石、碎石)在火灾中随着温度升高而发生体积膨胀，特别是含有石英的花岗石在500℃时会发生急剧的体积膨胀，这些都会使混凝土强度降低。

为了提高预应力混凝土楼板的耐火极限，防止混凝土强度在高温下降低过多，以至失去承重的作用，故宜在钢筋混凝土表面涂上防火隔热涂料。混凝土结构防火涂料类似于钢结构防火涂料，但在性能要求上有所不同，由于涂料应用在有碱性的混凝土表面，所以要求涂料有好的耐碱性或在使用时预先涂刷抗碱封闭底漆。

5.6.4地下建筑一般处于相对封闭的环境之中，如果存在有毒有害物质的释放，很容易长时间积聚，对地下空间内的人员产生伤害。同时，如果在防火涂料火灾高温条件下释放有害气体，将对人员逃生及救灾不利。因此，对于使用在地

下建筑中的防火涂料，要求粘结牢、耐火极限高、燃烧时无有毒气体产生。

## 5.7 其它防火隔热材料

5.7.1除防火涂料和防火板外，其它防火隔热材料可分为二类，一类为密度较大的硬质板块状材料，另一类为密度较小的柔性毡状材料。其分类依据见表C5.7.1-1规定，主要技术性能参数可按表C5.7.1-2采用。

表C5.7.1-1:其它防火隔热材料的分类

品种	性能与使用特点	实例
硬质板块状材料	密度较大，硬度高采用砌筑方式施工，外表面用水泥(或石膏)砂浆粉刷	各种粘土砖加气混凝土砌块等
柔性毡状材料	各种矿物棉毡，采用钢丝网将棉毡固定于钢材表面，一般外面用防火板封闭	硅酸铝棉毡、岩棉毡、玻璃棉毡

表C5.7.1-2 其它防火隔热材料的主要技术性能参数

材料名称	参考尺寸(mm)	密度(kg/m <sup>3</sup> )	抗压强度(MPa)	比热(kJ/(kg·°C))	导热系数(W/(m·°C))	执行标准
各种粘土砖	240×115×50	1700	7.0~30	1.0	≤0.43	GB/T5101
粘土空心砖	240×115×90	1200~1400	5~10	—	≤0.43	GB13544
加气混凝土砌块	600×300×240	400!~700	2.5~5	1.0~1.2	0.12~0.25	GB8239
陶粒空心砌块	390×240×190	≤800	≥2.5	—	0.58	GB15229
微孔硅酸钙保温板	500×300×50	200~250	≥0.5	—	≤0.058	GB1069
水泥蛭石板	500×300×50	≤500	≥0.5	—	≤0.14	JC4429
水泥珍珠岩板	500×300×50	≤400	≥0.5	—	≤0.087	GB10303
硅酸铝棉毡	1000×500×10~50	≤350	—	0.84	≤0.06	GB3003
矿渣棉毡	1000×250×50	≤120	—	0.75	≤0.048	GB11835
岩棉毡	900×900×50	200	—	—	≤0.049	GB11835
玻璃棉毡	1200×600×50	≤48	—	—	≤0.048	GB13350

加气混凝土板	—	400~650	2.5~5	1.0~1.2	0.1~0.15	GB15762
C20混凝土	—	2200~2400	13.4	0.9~0.98	1.0~2.0	—
M5砂浆	—	2000	—	—	0.9	—

5.7.2由固体热传导的偏微分控制方程不难看出，控制固体热传导问题的相关材料热工参数主要是导热系数、密度和比热容。在存在防火保护的结构温度场计算时，需要此三个参数作为基本条件。



## 6 火灾作用效应

### 6.1 构件升温计算

6.1.1在火场温度分布较为均匀的情况下，计算结果表明：（1）除端部附近外，梁、柱等杆系构件的温度场沿轴向几乎相同；（2）除周边附近外，墙、板等平面构件的温度场在平面内几乎相同。

6.1.3火灾下钢筋混凝土中热量的传播分为两个阶段，三种方式。在受火面，热量通过热对流和热辐射的方式传播到混凝土表面，在混凝土内部通过热传导继续传播。

6.1.4使用此温度场简化计算方法时需注意只有在 $\eta_w$ 、 $\eta_x$ 同时为正值时结果才具有意义。由于该方法中没有考虑构件厚度，即背火面的边界条件，所以随着计算深度 $x$ 的增加误差会逐渐变大。但是，在靠近受火面的深度，计算结果较精确，例如本文计算案例中的20mm处。建议使用该方法时，计算深度不要超过30mm。

6.6.1 式6.1.6是以单位长度钢构件为计算对象，同时假定：（1）保护材料外表面的温度等于构件周围空气的温度；（2）由外部传入的热量全部消耗于提高构件和保护材料的温度，不计其它热损失；（3）钢构件截面温度均匀分布，保护层厚度内温度线性分布。

由传热学有：在微小时间增量 $\Delta t$ 内，通过保护材料传入构件单位长度内的总热量为：

$$\Delta Q = \frac{\lambda_i}{d_i} [T_g(t) - T_s(t)] F_i \Delta t$$

在 $\Delta t$ 内，构件环境温度上升为 $\Delta T_g$ ，单位长度构件吸热为：

$$\Delta Q_1 = c_s \rho_s V [T_s(t + \Delta t) - T_s(t)]$$

保护材料吸热为

$$\Delta Q_2 = \frac{T_s(t + \Delta t) - T_s(t) + \Delta T_g}{2} c_i \rho_i F_i d_i$$

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2$$

整理，忽略次要项即得式6.1.6。

当梁上部支承钢筋混凝土板，或柱部分靠墙时，式6.1.6偏于安全。当构件的截面系数  $F_i/V < 10\text{m}^{-1}$  时，式6.1.6不再适用。利用式6.1.6计算钢构件温度时， $\Delta t$  不应超过30s以免误差过大。

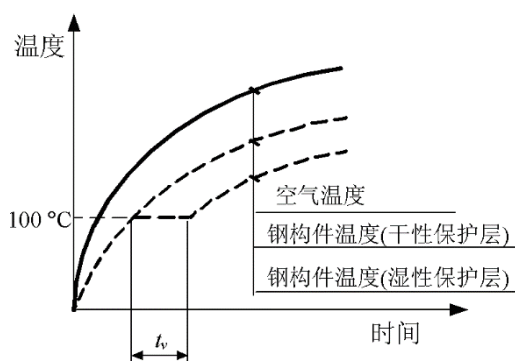
6.1.7裸露钢构件的温度计算应考虑构件的表面热阻，即构件表面温度小于周围气体温度，所以引入对流和辐射传热系数。对流传热系数  $\alpha_c$ ，辐射传热系数  $\alpha_r$ ，根据EUROCODE1取值。

当构件有非膨胀型防火被覆时， $B$ 的精确表达式为：

$$B = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_c + \alpha_r} + (1 + \frac{c_i \rho_i d_i F_i}{2c_s \rho_s V}) \frac{d_i}{\lambda_i}} \cdot \frac{F_i}{V}$$

但一般情况下， $(\alpha_c + \alpha_r) \gg \frac{\lambda_i}{d_i}$ ，故式(6.1.7-3)的简化是可以接受的。

6.1.8由于高温下水分蒸发吸热，含水的防火保护层会延迟火灾下钢构件的升温，见图C6.1.8。防火保护层内含水率的大小与保护层材料的特性、环境湿度等因素有关，表C6.1.8为部分防火隔热材料的平衡含水率，供设计人员在缺乏具体数据时参考。



图C6.1.8火灾下有湿性保护层钢构件升温的延迟时间

表C6.1.8 部分防火隔热材料的平衡含水率

材 料	平衡含水率 $p$ (%)
-----	---------------

喷涂矿物纤维	1.0
石膏板	20.0
硅酸钙板	3.0~5.0
矿（岩）棉板	2.0
粘土砖、灰砂砖	0.2
珍珠岩和蛭石板	15.0
加气混凝土	2.5
轻骨料混凝土	2.5
普通混凝土	1.5

## 6.2 火灾下结构和构件内力和变形计算

**6.2.1~6.2.3** 当结构构件温度分布以及高温材性模型可以确定时，宜采用结构分析的方法计算火灾下结构的内力和变形。高温下的结构分析方法和常温下的结构分析方法完全相同，只是高温分析中必须考虑材料本构关系的不断改变。

由于火灾一般只发生并局限于建筑物的局部，因此也可以采用子结构分析模型计算火灾下局部结构的内力与变形。子结构包括火灾区域结构部分并适当延伸，其边界条件(包括边界上的作用力)由常温下的结构分析得出并假定在火燃烧过程中保持不变。

进行构件抗火设计时，构件上的内力可由火灾下整体结构分析方法或子结构分析方法得到。

**6.2.4**当不进行火灾下整体结构分析或子结构分析时，火灾区域构件由外荷载产生的内力可以按照常温下结构分析的结果进行折减（考虑受火构件弹性模量降低），折减系数取为0.9一般偏于保守。非火灾区域构件的内力假定和常温下相同。

## 7 抗火验算

### 7.1 一般规定

7.2.1-7.2.3在火灾时，受火构件根据实际情况要求，应该满足承载能力（R准则），完整性（E准则）和隔热性（I准则）中的一个或多个。本规范防火性能包含完整性和隔热性。根据Eurocode 2 Part 1-2(BS EN 1992-1-2: 2004, Design of concrete structures: General rules- Structural fire design 第2.1.2条与《建筑构件耐火试验方法》GBT 9978.1-2008第10.2条编制本款。

7.1.5火灾下随着结构温度的升高，材料强度下降，结构承载力也下降。当结构承载力 $R_d$ 降至与各种作用组合效应 $S_m$ 相等时，结构达到承载力极限状态。结构从受火到达到承载力极限状态所需的时间为结构耐火时间；结构达到承载力极限状态时的温度称为临界温度。本条所列钢结构抗火设计的三个要求是等价的，满足其中一个要求即可保证结构未达抗火承载能力极限状态而能继续安全承载。

7.1.6 判断结构或构件的防火性能的主要指标是背火面的温度。

### 7.2 抗火承载力极限验算

7.2.1 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。[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]。

对应于不同的性能水准A、B、C，对于结构火灾下和火灾后的性能有不同的要求，根据经验选取1.30,1.20, 1.15三个安全系数是比较保守的。今后可对此系数进一步进行研究，获取更为准确的系数。

7.2.2根据已有的试验研究和理论分析，高温下普通混凝土结构、钢结构、钢-混凝土组合结构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

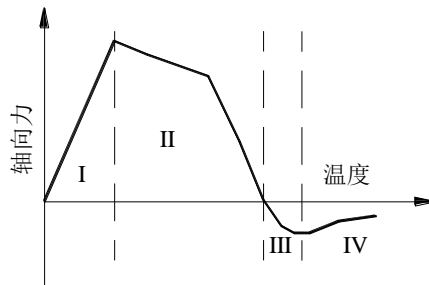
似，因此常温构件的承载力计算原则和方法也适用于高温构件。

7.2.3 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强度采用标准值是适宜的。

7.2.5参考Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, EN 1992-1-2, 2004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。

### 7.2.6

1 框架梁上一般有楼板或其他支撑，可防止梁的整体失稳。而且试验和理论研究均发现，对于两端有一定轴向约束的框架梁，在火灾高温下，梁的轴力首先为压力，但随着梁挠曲变形的增大，由于悬链线效应，梁中轴压力将逐渐减小，直至为零，再变为拉力。随着轴向拉力的发展，梁仍然能再承受较高些的温度才会发生强度破坏（见图C7.3.2）。因此框架梁的防火设计，可偏于安全地取梁中温度轴力为零时的状态，进行防火承载力验算。



图C7.2.6两端约束钢梁轴力随温度的变化

关于约束钢梁悬链线效应的研究，可参见论文：①T. C. H. Liu 等，“Experimental investigation of behaviour of axially restrained steel beams in fire”, Journal of constructional steel research. 2002.58 :p1211-1230.②Yin Y.Z., Wang Y.C, “Analysis of catenary action in steel beams using a simplified hand calculation method, Part 1: theory and validation for uniform temperature distribution”, Journal of constructional steel research, 2005. 61: p188-211.③郭士雄, 李国强, “火灾下约束钢梁的受力性能及防火设计方法”, 建筑结构, 35(12), 2005: p59-61。

2 本部分中钢框架梁的临界温度，是按7.2.6-1节相应构件的防火承载力验算要

求，根据临界温度的定义，通过数值计算确定的。

## 7.3 隔热极限状态验算

7.3.1参考Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, EN 1992-1-2, 2004中2.1.3条(2)和《建筑构件耐火试验方法》(GBT 9978.1-2008)中10.2.2和10.2.3条制定本条款。

# 8 防火保护措施

## 8.1 保护措施及其选用原则

## 8.2 防火保护构造

8.3.1 8.3.1在火灾高温条件下，混凝土构件受热表面层发生的块状爆炸性脱落现象，称为混凝土爆裂。影响爆裂的因素分为内部因素和外部因素。

内部因素包括混凝土水灰比、含水率、外掺料、骨料、渗透性和试件形状等：(1)随着水灰比的降低和含水率的提高，混凝土容易发生爆裂。(2)相关研究表明，粉煤灰掺和料有助于提高混凝土的抗爆裂性；但是，即便是加入少量的硅灰和偏高岭土也会显著增加混凝土爆裂的危险性。(3)对于骨料的影响，目前较为一致的观点是：相比于硅质骨料，石灰石、轻骨料和干燥骨料可使混凝土爆裂敏感性降低。但是，实验表明，由于骨料吸水，在油或天然气燃烧升温条件下，轻骨料混凝土的抗爆裂性低于普通混凝土。(4)高强混凝土爆裂的发生机率远高于普通混凝土。实验表明，处于水饱和状态时，高强混凝土发生爆裂的概率是100%。内部因素的影响可以概括为：高含水率和低渗透性导致了孔隙水(汽)压力迅速上升，当孔隙水(汽)压力超过混凝土强度时将引发混凝土爆裂。

外部因素包括升温速率、应力——温度途径方式和荷载水平等：(1)与电加热升温相比，油或天然气燃烧升温条件下的混凝土爆裂发生几率非常高，即便是普通混凝土也不例外。(2)通常混凝土爆裂发生的温度范围是300~600℃。(3)与无载升温相比，恒温加载和恒载升温条件更容易导致混凝

土发生爆裂。实验发现，预应力混凝土构件比普通钢筋混凝土构件更容易发生爆裂。这些外部因素的影响可以概括为：热应力的快速增加或与外部荷载组合导致了混凝土爆裂。

8.3.2混凝土爆裂一方面取决于自身的含水量、渗透性和非均匀性，另一方面取决于温升速率和温度梯度。对于钢筋混凝土结构，还要考虑构造配筋和荷载的影响。考虑从材料和构造两个方面来对混凝土的爆裂采取相应防治措施。

1. 目前使用的防火涂料分为膨胀型防火涂料和非膨胀型防火涂料两种。膨胀型防火涂料属发泡型，在火焰或高温作用下，涂层受热迅速膨胀成比原来厚度大几十倍的泡沫碳化层，从而能有效的阻挡外部热源对底材的作用。膨胀型防火涂料根据分散介质的不同可分为水性和溶剂型两类。非膨胀型防火涂料由难燃性树脂、阻燃剂、防火填料等配制而成，在火焰和高温作用下，无机非膨胀防火涂料遇火不燃，并释放出低分子惰性气体，冲淡、覆盖和捕获促进燃烧的游离基。防火板主要有蛭石混凝土板、珍珠岩板、石棉水泥板、搪瓷钢板和石膏板等。

2. 目前改善混凝土抗爆裂性能的比较有效的方法是在混凝土中掺入聚丙烯纤维，其抗爆裂的机理是：当混凝土遭受高温时，一旦温度超过了聚丙烯纤维的熔点 $160^{\circ}\text{C}$ ，混凝土内高度分散的聚丙烯纤维就会熔化逸出，在混凝土中留下相当于纤维所占体积的相互连通的孔隙，使得混凝土内部的渗透性显著增大，减缓了内部蒸汽压的积聚，从而避免了管片的爆裂。国内外的研究表明，聚丙烯纤维的含量越高，混凝土的抗爆裂性能越好；同时，由于聚丙烯纤维抗爆裂的性能依赖于纤维熔化后形成的孔隙的连通性，因此，纤维越长，越能够产生更多的相互连通的孔隙，抗爆裂性能也越好。需要注意的是，聚丙烯纤维虽然能较好的改善爆裂，但较多含量的聚丙烯纤维掺入会降低抗压强度，并对混凝土的和易性产生很大的影响。

3. 选用热稳定性好的骨料。相关研究表明，不同种类骨料的热稳定性由低到高依次为：燧石、石灰石、玄武岩、花岗岩、辉长岩。例如，花岗岩在 $600^{\circ}\text{C}$ 时仍能够保持热稳定性。此外，轻骨料也能够改善混凝土的抗爆裂性能。选用热膨胀小的骨料，以减弱骨料与水泥基体间的热不相容性。选用表面粗糙、多棱角的骨料，可提高骨料与水泥基体间的结合力。选用含活性硅的骨料，可改

善骨料与水泥基体间的化学粘结力。