上海市工程建设规范

建筑钢结构防火技术规程

Technical code on fire safety of steel building structures

DG/TJ08－008－2000

主编单位：同济大学
上海市消防协会
批准部位：上海市建设和管理委员会
施行日期：2000 年 10 月 1 日

2000 上海

上海市建设和管理委员会文件

沪建建(2000)第0544号

关于批准《建筑钢结构防火设计规程》为上海市工程建筑规范的通知

各有关单位：

根据我委沪建建(98)第0088号文下达的上海市工程建设规范编制计划的要求，由同济大学、上海市消防协会主编的《建筑钢结构防火设计规程》，经有关专家审查和我委审核，现批准为上海市工程建设推荐性规范，统一编号为DG/TJ08－008－2000，自2000年10月1日起实施。

该推荐性规范由上海市工程建设标准办公室负责组织实施，同济大学负责解释。

上海市建设和管理委员会

二〇〇〇年八月六日

前　言

本《规程》是按市建委沪建建(98)第0088号文下达的上海市工程建设地方标准、规范和标准设计编制要求，由同济大学和上海市消防协会共同任主编单位编制的。

本《规程》是为适应我国建筑钢结构防火技术设计的需要编制而成。《规程》共分八章和三个附录，包括总则、符号和术语、钢结构耐火极限要求、钢材及防火被覆材料特性、钢结构抗火设计规定、钢结构抗火计算、钢结构抗火验算、钢结构防火保护构造及施工要求等内容。本《规程》采用了国内外近期的研究成果，参考了国外先进的钢结构抗火技术标准，给出了钢结构防火保护层厚度的理论计算方法，并进行了试验验证。同时结合我国在钢结构的防火保护材料和技术方面的最新发展，力求使《规程》既能保证火灾时建筑钢结构的抗火安全，又对发展钢结构新技术、新材料有利。通过广泛征求设计、施工安装、消防和防火材料生产厂等方面专家的意见，对某些条文进行了多次调整之后，经有关部门会审定稿。

本《规程》是国内第一部针对建筑钢结构防火技术设计的标准，请各单位在执行本《规程》的过程中，将发现的问题、意见和建议及时寄至上海市四平路1239号，邮编(200092)同济大学建筑工程系《建筑钢结构防火技术规程》编制组。

主编单位：同济大学
上海市消防协会
参加单位：上海市消防局
上海市金属结构协会
上海市建筑科学研究院

公安部上海消防科研所
上海现代建筑设计集团
冶金部建筑研究总院
沪东造船厂
上海汇丽集团二厂
北京城建天宁消防责任有限公司
上海美建钢结构有限公司
巴特勒上海有限公司
上海金宗化工有限公司

主要起草人员： 李国强　蒋首超　王瑞宫　殷李革　张关兴
林桂祥　叶小琪　汪大绥　曾　杰　沈友弟
贺军利　崔鸿超

目　次

1　总　则……（1）
2　符号和术语……（2）
2.1　符号……（2）
2.2　术语……（5）
3　钢结构耐火极限要求……（8）
3.1　建筑分类……（8）
3.2　建筑物的耐火等级……（11）
4　钢材及防火被覆材料特性……（14）
4.1　钢材……（14）
4.2　防火涂料……（16）
4.3　防火板……（17）
4.4　其它防火隔热材料……（18）
5　钢结构抗火设计规定……（20）
5.1　钢结构抗火极限状态及抗火设计要求……（20）
5.2　钢结构抗火设计原则……（20）
6　钢结构抗火计算……（22）
6.1　室内火灾升温曲线……（22）
6.2　火灾下钢构件内部温度……（22）
6.3　火灾下钢构件温度内力及变形计算……（25）
6.4　火灾下钢结构在外荷载下的内力和变形计算……（28）
7　钢结构抗火验算……（29）
7.1　作用效应组合及抗火设计步骤……（29）
7.2　基本受力钢构件的抗火承载力极限状态验算……（30）
7.3　特定条件下钢梁、钢柱的抗火承载力极限状态验算 ……
……（33）

8　钢结构防火保护构造及施工要求…… (36)
8.1　提高钢结构耐火时间的措施及选用原则…… (36)
8.2　钢结构防火保护构造…… (37)
8.3　钢结构防火保护施工要求…… (41)
附录A　室内火灾的升温过程 …… (43)
附录B　标准火灾升温条件下钢构件的升温 …… (45)
附录C　本规程用词说明 …… (53)

1 总 则

1.0.1 为减轻钢结构在火灾中的破坏，避免钢结构建筑在火灾中局部和整体倒塌造成人员伤亡及疏散和灭火困难，减少火灾后钢结构的修复费用与间接经济损失，安全、经济、合理地对钢结构采取防火保护措施，特制订本技术规程。

1.0.2 本规程适用于下列新建、扩建和改建的各类钢结构建筑和其它建筑中的钢结构构件：

1 民用钢结构建筑；

2 工业用钢结构建筑；

3 工业和民用建筑中的钢结构构件。

1.0.3 在进行钢结构防火技术设计时，除执行本《规程》规定外，还应符合国家、行业和上海市现行的有关标准的规定。

2 符号和术语

2.1 符 号

ξ——构件的荷载等级

α——系数

α_b——系数

α_c——以对流方式由空气向构件表面传热的传热系数

α_r——以辐射方式由空气向构件表面传热的传热系数

α_s——钢材的热膨胀系数

β_m，β_t——等效弯矩系数

δ——构件的特征变形

χ_T——高温下钢材弹性模量折减系数

η_T——高温下钢材强度折减系数

λ——构件的长细比

λ_i——保护层的导热系数

λ_s——钢材的导热系数

ρ_i——保护层的密度

ρ_s——钢材的密度

γ_F——温度效应的分项系数

γ_G——永久荷载分项系数

γ_{Qi}——楼面或屋面活载分项系数

γ_R——钢材抗力分项系数或钢材抗火设计强度调整系数

γ_W——风载分项系数

γ_x——塑性发展系数

φ——常温下对应长细比和截面类型的轴心受压柱的稳定系数

φ_{bT}——高温下钢梁的整体稳定系数

φ_T——高温下轴心受压构件的稳定系数

φ_{yT}——高温下工字形截面梁下翼缘关于 y 轴的稳定系数

$\triangle t$——时间增量

$\triangle T$——构件或结构的温度变化

A——构件截面面积

A_f——一个翼缘截面面积

A_w——梁腹板截面面积

B——构件单位长度综合传热系数

B_n——与梁连接有关的常数

c_s——钢材的比热容

c_i——保护层的比热

C_G、C_{Qi}、C_W、C_F——分别为永久荷载、楼面或屋面活载、风载和温度影响的效应系数

d_i——保护层厚度

E——常温下钢材的弹性模量

E_T——高温下钢材的弹性模量

f——常温下钢材的设计强度

F——构件单位长度的受火表面积

F_i——单位构件长度的保护层的内表面积

f_y——常温下钢材的屈服强度

f_{yT}——高温下钢材的屈服强度

G_k——永久荷载标准值

h——构件的截面高度

h_w——梁腹板的高度

I——受火构件截面惯性矩

I_f——梁下翼缘绕 y 轴的惯性矩

l——构件的长度或跨度

l_0——构件的计算长度

M_{fi}——按等效作用力分析得到的受火构件的杆端弯矩

M_p——塑性弯矩

M_T——受火构件的杆端温度弯矩

M_L、M_R——分别为构件两端的温度弯矩

M_x——构件的最大弯矩设计值

N——构件轴力设计值

N_{EXT}——高温下的欧拉临界力

N_f——按等效作用力分析得到的受火构件的轴力

N_T——受火构件的轴向温度内力

P——保护层中所含水份的百分比

q——梁所受的均布荷载或等效均布荷载

Q_{ki}——楼面或屋面活载标准值

R——常温下结构或构件的最大承载力

R_d——高温下结构或构件的承载力

S——荷载组合效应

S_f——梁下翼缘关于 X 轴的面积矩

S_m——高温下结构或构件内的组合效应

t——时间

t′——构件温度达到 100℃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_w——梁腹板的厚度

T_0——受火前构件的内部温度

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'_g——实际室内火灾升温

$T_g(0)$——火灾发生前的室内平均空气温度

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——耐火时间内结构或构件的最高温度

T_{s0}——火灾前构件的初始温度

V——单位长度构件的体积

υ_s——钢材的泊桑比

W_k——风载标准值

W_p——截面塑性抵抗拒

W_x——绕 X 轴的毛截面抵抗矩

lg(x)——以 10 为底的对数函数。

2.2 术语

2.2.1 耐火极限 duration of fire resistance

建筑构件按时间—温度标准曲线进行耐火试验，从受到火的作用时起，到失去支持能力或完整性被破坏或失去隔火作用时止的这段时间，用小时表示。

2.2.2 不燃烧体 non－combustible member

用不燃烧材料做成的建筑构件。不燃烧材料系指符合国家标准 GB8624《建筑材料燃烧性能分级方法》中规定的 A 级材料。

2.2.3 难燃烧体 hard－combustible member

用难燃烧材料做成的建筑构件或用燃烧材料做成而用不燃烧材料做保护层的建筑构件。难燃烧材料系指符合国家标准GB8624《建筑材料燃烧性能分级方法》中规定的B1级材料。

2.2.4 燃烧体 combustible member

用可燃烧材料作成的建筑构件。可燃烧材料系指符合国家标准GB8624《建筑材料燃烧性能分级方法》中规定的B2、B3级材料。

2.2.5 重要公共建筑 important public building

性质重要、人员密集、发生火灾后损失大、影响大、伤亡大的公共建筑。(如:省、市级以上的机关办公楼,电子计算机中心,通讯中心,宾馆,大型商场、超市、体育馆、展览厅、影剧院、娱乐场所等)。

2.2.6 火灾荷载密度 fire load density

单位楼面面积上可燃物折算成标准木材的质量,单位为kg/m^2。标准木材的燃烧热值为18.4MJ/kg。

2.2.7 标准火灾升温 standard fire

指国际标准组织标准ISO834给出的用于进行耐火试验的炉内平均空气温度与时间的关系曲线。

2.2.8 等效曝火时间 equivalent time of fire exposure

在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与标准火灾在时间t_e对同一构件或结构(外荷载相同)的作用相同,这段时间t_e被称为等效曝火时间。

2.2.9 临界温度 critical temperature

指外荷载作用下的构件或结构,若在火灾时所有构件沿构件长度和截面均匀升温,构件或结构达到抗火承载力极限状态时构件截面上的温度。

2.2.10 抗火承载力极限状态 limit state for fire resistance

火灾下随着构件或结构内部温度的升高,构件或结构的承载

力下降，当构件或结构的承载力下降到与外荷载作用（包括温度作用）产生的组合效应相等时的状态称为抗火承载力极限状态。

2.2.11 荷载等级 load level 或 load ratio

达到抗火承载力极限状态时，构件或结构上的作用效应大小与该构件或结构在常温下的承载力之比。

2.2.12 裙房 skirt building

与高层建筑相连的建筑高度不超过 24 米的附属建筑。

3 钢结构耐火极限要求

3.1 建筑分类

3.1.1 厂房根据其生产的火灾危险性，可按表3.1.1分类。

表3.1.1 生产的火灾危险性分类

生产类别	火灾危险性特征
甲	使用或生产下列物质的生产 1 闪点小于28℃的液体 2 爆炸下限小于10%的气体 3 常温下能自行分解或在空气中氧化即能导致迅速自燃或爆炸的物质 4 常温下受到水或空气中水蒸汽的作用，能产生可燃气体并引起燃烧或爆炸的物质 5 遇酸、受热、撞击、摩擦、催化以及遇有机物或硫磺等易燃的无机物，极易引起燃烧或爆炸的强氧化剂 6 受撞击、摩擦或与氧化剂、有机物接触时能引起燃烧或爆炸的物质 7 在密闭设备内操作温度等于或超过物质本身自燃点的生产
乙	使用或产生下列物质的生产 1 闪点大于等于28℃小于60℃的液体 2 爆炸下限大于等于10%的气体 3 不属于甲类的氧化剂 4 不属于甲类的化学易燃危险固体 5 助燃气体 6 能与空气形成爆炸性混合物的浮游状态的粉尘、纤维、闪点大于等于60℃的液体雾滴
丙	使用或产生下列物质的生产 1 闪点大于等于60℃的液体 2 可燃固体
丁	具有下列情况的生产 1 对非燃烧物质进行加工，并在高温或熔化状态下经常产生强辐射热、火花或火焰的生产 2 利用气体、液体、固体作为燃料或将气体、液体进行燃烧作其它用的各种生产 3 常温下使用或加工难燃烧物质的生产
戊	常温下使用或加工非燃烧物质的生产

注：1. 在生产过程中，如使用或产生易燃、可燃物质的量较少，不足以构成爆炸或火灾危险时，可以按实际情况确定其火灾危险性的类别；

2. 一座厂房内或防火分区内有不同性质的生产时，其分类应按火灾危险性较大的部分确定，但火灾危险性大的部分占本层或本防火区面积的比例小于5%（丁、戊类生产厂房的油漆工段小于10%），且发生事故时不足以蔓延到其它部位，或采取防火措施能防止火灾蔓延时，可按火灾危险性较小的部分确定；

3. 丁、戊类生产厂房的油漆工段，当采用封闭喷漆工艺时，封闭喷漆空间内保持负压，且油漆工段设置可燃气体浓度报警系统或自动抑爆系统时，油漆工段占其所在防火分区面积的比例不应超过20%。

3.1.2 仓库根据其储存物品的火灾危险性，可按表 3.1.2 分类。

表 3.1.2 储存物品仓库的火灾危险性

储存物品分类	火灾危险性的特征
甲	1 闪点小于 28℃ 的液体 2 爆炸下限小于 10% 的气体，以及受到水或空气中水蒸汽的作用，能产生爆炸下限小于 10% 气体的固体物质 3 常温下能自行分解或在空气中氧化即能导致迅速自燃或爆炸的物质 4 常温下受到水或空气中水蒸汽的作用能产生可燃气体并引起燃烧或爆炸的物质 5 遇酸、受热、撞击、摩擦以及遇有机物或硫磺等易燃的无机物，极易引起燃烧爆炸的强氧化剂 6 受撞击、摩擦或氧化剂、有机物接触时能引起燃烧或爆炸的物质
乙	1 闪点大于等于 28℃ 小于 60℃ 的液体 2 爆炸下限大于等于 10% 的气体 3 不属于甲类的氧化剂 4 不属于甲类的化学易燃危险固体 5 助燃气体 6 常温下与空气接触能缓慢氧化，积热不散引起自燃的物品
丙	1 闪点大于等于 60℃ 的液体 2 可燃固体
丁	难燃烧物品
戊	非燃烧物品

注：难燃物品、非燃物品的可燃包装重量超过物品本身重量 1/4 时，其火灾危险性应为丙类。

3.1.3 高层民用建筑根据其使用性质、火灾危险性、疏散和扑救难度可按表 3.1.3 分类。

表 3.1.3 高层民用建筑分类

名称	一 类	二 类
居住建筑	高级住宅 十九层及十九层以上的普通住宅	十层至十八层的普通住宅
建筑	1 医院 2 高级旅馆 3 建筑高度超过 50m 或每层建筑面积超过 1000m^2 的商业楼、展览楼、综合楼、电信楼、财贸金融楼 4 建筑高度超过 50m 或每层建筑面积超过 1500m^2 的商住楼 5 中央级和省级(含计划单列市)广播电视楼 6 网局级和省级(含计划单列市)电力调度楼 7 省级(含计划单列市)邮政楼、防灾指挥调度楼 8 藏书超过 100 万册的图书馆、书库 9 重要的办公楼、科研楼、档案楼 10 建筑高度超过 50m 的教学楼和普通的旅馆、办公楼、科研楼、档案楼等	1 除一类建筑以外的商业楼、展览楼、综合楼、电信楼、财贸金融楼、商住楼、图书馆、书库 2 省级以下的邮政楼、防灾指挥调度楼、广播电视楼、电力调度楼 3 建筑高度不超过 50m 的教学楼、普通的旅馆、办公楼、科研楼、档案楼等

3.2 建筑物的耐火等级

3.2.1 单、多层建筑的耐火等级分为四级，高层建筑的耐火等级

分为一、二两级，其建筑构件的燃烧性能和耐火极限不应低于表3.2.1的规定。

表3.2.1 单、多层、高层建筑构件的燃烧性能和耐火极限

燃烧性能和耐火极限(h) / 耐火等级 / 构件名称		单、多层建筑				高层建筑	
		一级	二级	三级	四级	一级	二级
柱	支承多层的柱	不燃烧体 3.00	不燃烧体 2.50	不燃烧体 2.50	不燃烧体 0.50	不燃烧体 3.00	不燃烧体 2.50
	支承单层的柱	不燃烧体 2.50	不燃烧体 2.00	不燃烧体 2.00	燃烧体		
梁		不燃烧体 2.00	不燃烧体 1.50	不燃烧体 1.00	难燃烧体 0.50	不燃烧体 2.00	不燃烧体 1.50
楼板		不燃烧体 1.50	不燃烧体 1.00	不燃烧体 0.50	难燃烧体 0.25	不燃烧体 1.50	不燃烧体 1.00
屋顶承重构件		不燃烧体 1.50	不燃烧体 0.50	燃烧体	燃烧体		
疏散楼梯		不燃烧体 1.50	不燃烧体 1.00	不燃烧体 1.00	燃烧体		

注：预制钢筋混凝土构件的节点缝隙或金属承重构件节点的外露部位，必须加设防火保护层，其耐火极限不应低于表3.2.1相应建筑构件的耐火极限。

3.2.2 钢结构构件应采用外包敷不燃烧体或喷涂防火涂料等防火保护措施，其耐火极限不应低于表3.2.1和本节的有关规定。

3.2.3 单、多层甲类厂、库房和乙类厂房的耐火等级不应低于二级，单、多层乙类、丙类库房耐火等级不宜低于二级。

3.2.4 单、多层丙类厂房耐火等级不宜低于二级。单层丙类厂房中设有自动喷水灭火系统全保护时，其各构件可不采取防火保护措施，其耐火等级可视为二级。多层丙类厂房中设自动喷水灭火系统全保护时，其柱、梁的耐火极限可按表3.2.1中相应的规定降低0.5h。

3.2.5 单层、多层、高层丁、戊类厂、库房中各构件可不采取防火保护措施，其耐火等级可视为二级，但使用甲、乙、丙类液体或可燃气体的部位，其耐火极限不应低于表3.2.1中的规定。

3.2.6 单层、多层重要的公共建筑应采用一、二级耐火等级。当建筑物中设自动喷水灭火系统全保护时，其柱、梁的耐火极限可按表3.2.1中相应的规定降低0.5h。

3.2.7 单层、多层一般公共建筑、居住建筑的耐火等级不应低于二级。当建筑物中设自动喷水灭火系统保护时，其各建筑构件的耐火极限可按表3.2.1中相应的耐火极限降低一半。

3.2.8 单、多层重要的公共建筑和甲、乙、丙类厂、库房及高层建筑(包括裙房、中庭)的屋顶承重构件，当设有自动喷水灭火系统保护时，可不采取其他防火保护措施。

丁、戊类厂、库房(使用甲、乙、丙类液体、可燃气体的部位除外)和单、多层一般公共建筑、居住建筑的屋顶承重构件可不采取防火保护措施。

3.2.9 一类高层建筑的耐火等级应为一级。

3.2.10 高层工业建筑(丁、戊类除外)、二类高层民用建筑和裙房的耐火等级不应低于二级。

当建筑物中设自动喷水灭火系统、火灾自动报警系统全保护时，其柱、梁的耐火极限可按表3.2.1中相应的规定降低0.5h。

3.2.11 压型钢板在楼板中仅起模板作用时，可不采取防火保护措施。压型钢板在楼板中起承重作用时应采取防火保护措施，但压型钢板——混凝土组合楼板的耐火极限不低于本节有关规定时，可不采取防火保护措施。

3.2.12 建筑物的承重钢结构中灌注防冻、防腐并能循环的溶液，且建筑中设自动喷水灭火系统全保护时，其承重结构可不再采取其它防火保护措施。

3.2.13 多层、高层建筑中当设有自动喷水灭火系统全保护(包括封闭楼梯间、防烟楼梯间)，高层建筑的防烟楼梯间及其前室设正压送风系统时，楼梯间中的钢结构可不采取其它防火保护措施。

4 钢材及防火被覆材料特性

4.1 钢材

4.1.1 高温下钢材的有关物理参数可按表 4.1.1 选用。

表 4.1.1 高温下钢材的物理参数

参数名称	代 号	数 值	单 位
热膨胀系数	α_s	1.4×10^{-5}	m/(mK)
导热系数	λ_s	45.0	W/(mK)
比 热	c_s	600	J/(kgK)
密 度	ρ_s	7850	kg/m^3
泊桑比	ν_s	0.3	

4.1.2 高温下钢材的弹性模量可按下式计算：

$$E_T=\chi_T E \qquad (4.1.2-1)$$

式中 χ_T——高温下钢材弹性模量折减系统，也可按表 4.1.2 选用；

$$\chi_T=-17.2\times10^{-12}T_s^4+11.8\times10^{-9}T_s^3-34.5\times10^{-7}T_s^2+15.9\times10^{-5}T_s+1 \quad (T_s\leqslant600℃) \qquad (4.1.2-2)$$

T_s——温度(℃)；

E_T——温度为 T_s 时钢材的弹性模量；

E——常温下钢材的弹性模量。

表 4.1.2 高温下钢材弹性模量折减系数 χ_T

T_s(℃)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
χ_T	0.989	0.986	0.983	0.980	0.977	0.974	0.971	0.968	0.964	0.961
T_s(℃)	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
χ_T	0.957	0.953	0.950	0.945	0.941	0.937	0.932	0.927	0.922	0.916
T_s(℃)	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
χ_T	0.910	0.904	0.897	0.889	0.881	0.872	0.862	0.851	0.839	0.826
T_s(℃)	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500
χ_T	0.812	0.797	0.781	0.763	0.743	0.722	0.698	0.673	0.646	0.617
T_s(℃)	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600
χ_T	0.585	0.551	0.515	0.475	0.433	0.388	0.339	0.288	0.232	0.173

4.1.3 高温下钢材的屈服强度可按下式计算：

$$f_{yT}=\eta_T \cdot f_y \qquad (4.1.3-1)$$

式中 η_T——高温下钢材强度折减系数，也可按表 4.1.3 采用；

$$\eta_T=1+\frac{T_s}{767\ln(\frac{T_s}{1750})} \quad (T_s\leqslant 600℃) \qquad (4.1.3-2)$$

f_{yT}——温度为 T_s 时钢材的屈服强度；

f_y——常温下钢材的屈服强度，可按下式确定；

$$f_y=\gamma_R f \qquad (4.1.3-3)$$

f——常温下钢材的强度设计值；

γ_R——钢材抗力分项系数，近似取 $\gamma_R=1.1$。

表 4.1.3 高温下钢材强度折减系采 η_T

T_s(℃)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
η_T	0.948	0.942	0.935	0.928	0.920	0.913	0.905	0.897	0.888	0.880
T_s(℃)	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
η_T	0.871	0.862	0.852	0.842	0.832	0.822	0.812	0.801	0.790	0.778
T_s(℃)	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
η_T	0.766	0.754	0.742	0.729	0.716	0.703	0.690	0.676	0.661	0.647
T_s(℃)	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500
η_T	0.632	0.616	0.600	0.584	0.568	0.551	0.534	0.516	0.498	0.480
T_s(℃)	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600
η_T	0.461	0.441	0.422	0.401	0.380	0.359	0.337	0.315	0.292	0.269

4.1.4 按第 4.1.2、4.1.3 条确定高温下钢材的材料特性时，常温下钢材的材料特性应按现行钢结构设计规范规定的设计指标采用。

4.1.5 高温下耐火钢的材料特性，应根据有关标准通过高温材性试验确定。

4.2 防火涂料

4.2.1 根据高温下钢结构防火涂料涂层变化情况可分膨胀型和非膨胀型二大类，其分类见表 4.2.1 规定。

表 4.2.1 防火涂料分类的依据

型 号	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，涂层厚度小于7毫米	有机树脂为基料，以及发泡剂、阻燃剂、碳化剂等
非膨胀型	H	遇火不膨胀，自身有良好的隔热性，涂层厚度8～40毫米	无机绝热材料(如膨胀蛭石，飘珠、矿物纤维)为主，以及无机粘结剂等

注：1. 膨胀型防火涂料又称薄型防火涂料，非膨胀型防火涂料又称厚型防火涂料、隔热型防火涂料；

2. 膨胀型涂料中将涂层只有2～3毫米，耐火极限可达1.5小时以上的又称之超薄型防火涂料。

4.2.2 选用钢结构防火涂料应符合以下要求：

1 应有产品鉴定证书，以及国家指定的防火建材检测机构提供的产品耐火性能的检测报告并有消防监督部门核发的生产许可证；

2 非膨胀型防火涂料应提供导热系数、比热和密度参数；

3 用于制造防火涂料的原料不得使用石棉材料和苯类溶剂，使用干式喷涂施工工艺，不得采用主要成分为矿物纤维的涂料，以免有害人体健康和污染环境；

4 防火涂料应呈碱性或偏碱性。底层涂料应能同防锈漆或钢板相容，并有良好的结合力。

4.2.3 室内钢结构防火涂料的技术性能应符合现行国家标准《钢结构防火涂料通用技术条件》(GB14907－94)的规定。

4.2.4 室外用钢结构防火涂料的技术要求除应符合第4.2.3条要求外，还需考察其耐水性和耐候性。

4.3 防火板

4.3.1 根据密度和使用厚度防火板可分防火薄板(又称不燃板)和防火厚板二大类，其分类见表4.3.1规定。

表 4.3.1 防火板分类

品种	性能特点			常用厚度 (mm)
	密度(kg/m^3)	导热系数(W/(m·K))	抗折强度(MPa)	
防火薄板	≥800	0.16～0.45	≥10.0	4～5
防火厚板	≤900	0.05～0.23	0.8～10.0	12～50

4.3.2 防火板材应符合以下要求：

1 应为不燃性(A级)材料；

2 在高温下(965℃)线收缩率≤2%；

3 受火时不炸裂，不产生裂纹；

4 应有产品鉴定证书，以及国家指定的防火建材检测机构提供的产品耐火性能的检测报告，并有消防监督部门核发的生产许可证。

4.3.3 当采用防火板进行钢结构防火保护时，生产厂家应提供产品的导热系数、密度和比热等参数。常用防火板主要技术性能可按表 4.3.3 采用。

表 4.3.3 常用防火板主要技术性能

项目	常用外形尺寸 长×宽×厚(mm)	密度 (kg/m^3)	比热 (kJ/(kg·K))	最高使用温度 (℃)	导热系数 (W/(m·K))
蛭石防火板	1000×610×20～65	430		1000	0.11
硅酸钙防火板	1220×2440×12～50	400～900		1000～1100	0.06～0.23

4.4 其它防火隔热材料

4.4.1 除防火涂料与防火板外，其它防火隔热材料可分二类，一类为密度较大的硬质板块状材料，另一类为密度较小柔性毡状材

料。其分类见表 4.4.1 规定。

表 4.4.1 其它防火隔热材料分类

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

4.4.2 其它防火隔热材料主要技术性能按表 4.4.2 采用。

表 4.4.2 其它防火隔热材料主要技术性能

材料名称	参考尺寸 长×宽×厚 (mm)	密度 (kg/m^3)	抗压强度 (MPa)	比热 (kJ/kg·K)	导热系数 (W/(m·K))
各种粘土砖	240×115×50	1700	7.45～20	1.0	≤0.43
粘土空心砖	240×115×90	1200～1400	5～10		≤0.43
加气混凝土砌块	600×300×240	500～700	2.5～5	1.0～1.2	0.12～0.25
陶粒空心砌块	390×240×190	≤800	≥2.5		0.58
微孔硅酸钙保温板	500×300×50	200～250	≥0.5		≤0.058
水泥蛭石板	500×300×50	≤500	≥0.25		≤0.14
水泥珍珠岩板	500×300×50	≤400	≥0.5		≤0.087
硅酸铝棉毡	1000×500×10～30	≤200		0.084	≤0.06
矿渣棉毡	1000×250×50	≤120		0.75	≤0.048
岩棉毡	900×900×50	≤200			≤0.049

4.4.3 当采用其它防火隔热材料用于钢结构防火保护时，生产厂家应提供导热系数、密度、比热、强度和耐候性参数。

5 钢结构抗火设计规定

5.1 钢结构抗火极限状态及抗火设计要求

5.1.1 当满足以下条件之一时，则认为钢结构构件达到抗火承载力极限状态：

1 轴心受力构件截面屈服；

2 受弯构件产生足够的塑性铰而成为可变机构；

3 构件丧失整体稳定。

5.1.2 从火灾发生到结构或结构构件达到抗火承载力极限状态的时间为结构或结构构件的耐火时间。

5.1.3 钢结构的抗火设计应满足下列要求之一：

1 在规定的结构耐火极限的时间内，结构或构件的承载力 R_d 应不小于各种作用所产生的组合效应 S_m

$$R_d \geqslant S_m \qquad (5.1.3-1)$$

2 在各种荷载效应组合下，结构或构件的耐火时间 t_d 应不小于规定的结构或构件耐火极限 t_m

$$t_d \geqslant t_m \qquad (5.1.3-2)$$

3 结构或构件的临界温度 T_d 应不小于在耐火极限时间内结构或构件的最高温度 T_m

$$T_d \geqslant T_m \qquad (5.1.3-3)$$

5.2 钢结构抗火设计原则

5.2.1 对满足下列条件之一的钢结构建筑应按本《规程》的要求进行抗火设计，其钢结构构件的防火保护层厚度应通过计算确定：

1 高度超过 120m 的建筑；

2 火灾荷载密度大于 200kg/m^2 的耐火等级为一级的建筑；

3 设计人员或建设单位要求进行计算的建筑。

5.2.2 除满足第 5.2.1 条规定外的建筑钢结构结构构件应按《建筑设计防火规范》(GBJ16－87)、《高层民用建筑设计防火规范》(GB50045－95)、《建筑构件耐火试验方法》(GB9978－88)及《钢结构防火涂料应用技术规范》(CECS24:90)的规定确定防火保护层的厚度，也可以按本规程规定的计算方法确定。

5.2.3 进行结构防火设计计算时，如果在内力组合中不考虑温度内力，则对于在结构中受约束较大的构件应将计算所得的保护层厚度增加 30％作为构件的保护层设计厚度。

5.2.4 连接节点的防火保护层厚度不得小于被连接构件保护层厚度的较大值。

6 钢结构抗火计算

6.1 室内火灾升温曲线

6.1.1 室内火灾的标准火灾升温过程按下式确定

$$T_g - T_g(0) = 345\lg(8t+1) \tag{6.1.1}$$

式中 T_g——对应 t 时刻的室内平均空气温度(℃)；

$T_g(0)$——火灾发生前的室内平均空气温度，一般取为 20℃；

t——时间(min)。

6.1.2 当能准确确定建筑室内有关参数时，可按附录 A 的方法计算室内火灾的空气升温过程。

6.1.3 实际室内火灾升温在任意时刻对结构的影响，可等效为标准火灾升温在等效曝火时刻对结构的影响。等效曝火时间 t_e 可由下列关系确定：

$$\int_0^t T'_g dt = \int_0^{te} T_g dt \tag{6.1.3}$$

式中 T'_g——实际室内火灾升温(℃)。

6.2 火灾下钢构件内部温度

6.2.1 火灾下钢构件的内部升温与构件是否有防火保护层及防火保护层的性质有关。当防火保护层满足式(6.2.1)给出的条件时，即可以认为是轻质保护层，否则为非轻质保护层：

$$c_s \cdot \rho_s \cdot V \geqslant 2c_i \cdot \rho_i \cdot d_i \cdot F_i \tag{6.2.1}$$

式中 ρ_s——钢材的密度(kg/m³)；

c_s——钢材的比热(J/(kg·K))；

V——单位长度构件的体积(m³/m)；

c_i——保护层的比热(J/(kg·K))；

ρ_i——保护层的密度(kg/m^3)；

F_i——单位构件长度的保护层的内表面积(m^2/m)；

d_i——保护层厚度(m)。

6.2.2 火灾下钢构件的内部升温可按(6.2.2)所示增量方式逐步计算：

$$T_s(t+\triangle t)=\frac{B}{\rho_s\cdot C_s}\cdot[T_g(t)-T_s(t)]\cdot\triangle t+T_s(t) \qquad (6.2.2)$$

式中 t——升温时间(s)；

$\triangle t$——时间增量(s)；

T_s——钢构件内部温度(℃)；

T_g——火灾时钢构件周围空气温度(℃)；

B——构件单位长度综合传热系数($W/(m^3K)$)。

附录B分别给出了标准火灾升温条件下，无保护层钢构件和采用不同参数防火被覆构件的升温。

6.2.3 钢构件单位长度综合传热系数B可按下列情况分别计算：

1 构件无防火保护层时

$$B=(\alpha_c+\alpha_r)\frac{F}{V} \qquad (6.2.3-1)$$

式中 F——构件单位长度的受火表面积(m^2/m)；

α_c——以对流方式由空气向构件表面传热的传热系数，可取 $\alpha_c=25(W/(m^2K))$；

α_r——以辐射方式由空气向构件表面传热的传热系数，可按下式计算：

$$\alpha_r=\frac{2.885}{T_g-T_s}\left[\left(\frac{T_g+273}{100}\right)^4-\left(\frac{T_s+273}{100}\right)^4\right] \quad (W/(m^2K)) \qquad (6.2.3-2)$$

2 构件有轻质防火保护层时

$$B=\frac{\lambda_i}{d_i}\cdot\frac{F_i}{V} \qquad (6.2.3-3)$$

式中 λ_i——保护层的导热系数(W/m·K)；

3 构件有非轻质防火保护层时。

$$B=\frac{1}{1+\frac{c_i\rho_i d_i F_i}{2c_s\rho_s V}}\cdot\frac{\lambda_i}{d_i}\frac{F_i}{V} \qquad (6.2.3-4)$$

6.2.4 当构件有防火保护层时，其在标准火灾升温条件下构件的内部温度可按下式近似计算：

$$T_s(t)=(\sqrt{0.044+5.0\times10^{-5}B}-0.2)t+T_{s0} \qquad (6.2.4)$$

式中 T_{s0}——火灾前构件的初始温度，一般取为 20℃；

t——火灾升温时间(s)，当为非标准火灾升温时，用第 6.1.3 条确定的等效曝火时间 t_e 代替。

6.2.5 当钢构件的防火被覆中含有水分时，宜考虑钢构件升温延迟现象(参见图 6.2.5)。此时钢构件的内部温度可按下式计算：

$$\begin{aligned} T'_s(t)&=T_s(t) && t<t' \\ T'_s(t)&=100℃ && t'\leqslant t\leqslant t'+t_v \\ T'_s(t)&=T_s(t+t_v) && t>t'+t_v \end{aligned} \qquad (6.2.5-1)$$

其中

$$t_v=\frac{12P\rho_i d_i^2}{\lambda_i} \qquad (6.2.5-2)$$

式中 t_v——延迟时间(s)；

t'——构件温度达到 100℃ 的时间(s)；

P——保护层中所含水分的质量百分比(%)；

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

$T_s(t)$——不考虑延迟现象的影响，构件在 t 时刻的内部温度，可按第 6.2.2、6.2.3 或 6.2.4 条确定。

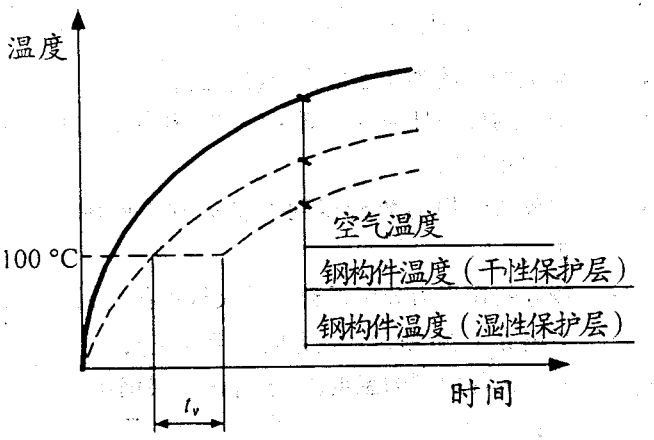


图 6.2.5　火灾下有湿性保护层钢构件升温的延迟时间

6.3　火灾下钢构件温度内力及变形计算

6.3.1　在进行钢结构抗火计算时，应考虑温度内力及变形的影响。

6.3.2　计算钢结构中某一构件受火升温的温度内力及变形时，可采用等效作用力方法。将受火构件的温度效应等效为杆端作用力（见图 6.3.2），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最后确定

$$N_T = N_{Te} - N_f \qquad (6.3.2-1)$$

$$M_{Ti} = M_{Te} - M_{fi} \qquad (6.3.2-2)$$

式中

$$N_{Te} = \alpha_s E_T A\left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_0\right) \qquad (6.3.2-3)$$

$$M_{Te}=\frac{E_T I}{h}\alpha_s(T_2-T_1) \qquad (6.3.2-4)$$

N_T——受火构件的轴向温度内力(压力)；

M_T——受火构件的杆端温度弯矩(方向与图 6.3.2b 所示 M_{Te} 方向相反)；

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_{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 6.3.2b 所示 M_{Te} 方向一致为正)；

T_1、T_2——受火构件两侧的温度，对于有保护层钢构件可取 $T_1=T_2$；

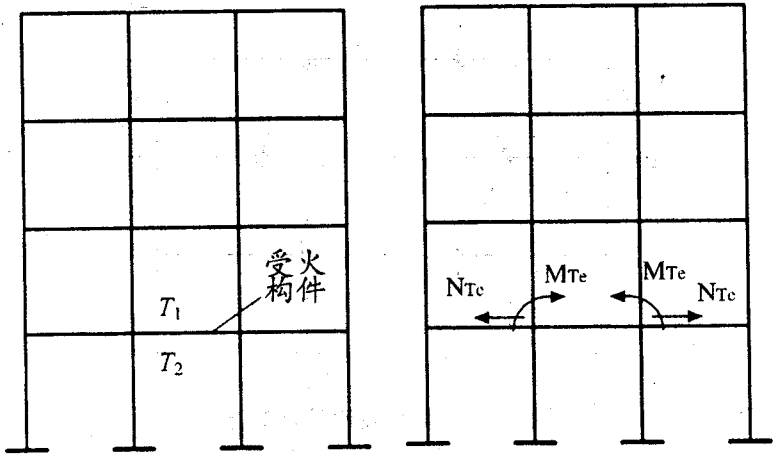
T_0——受火前构件的温度；

E_T——温度为$(T_1+T_2)/2$ 时钢材的弹性模量；

A——受火构件截面面积；

I——受火构件截面惯性矩；

h——受火构件截面高度。



(a)构件的升温　　(b)等效作用力

图 6.3.2　结构温度效应的等效

6.3.3　计算框架柱的温度内力时，如果仅考虑该柱升温，相邻柱不升温，则该柱的温度内力可根据计算结果折减 30%。

6.3.4　框架梁的温度轴力应按下式确定：

$$N'_T = \min(N_T, N_p) \qquad (6.3.4-1)$$

式中　N_T——按结构处于弹性状态求得的框架梁的轴向温度内力；

N_p——框架梁一侧所有上下柱两端屈服时(图 6.3.4)，梁内的轴力；

$$N_p = \sum \frac{2M_{pi}}{h_i} \qquad (6.3.4-2)$$

M_{pi}——梁一侧上柱或下柱的塑性弯矩；

h_i——柱高。

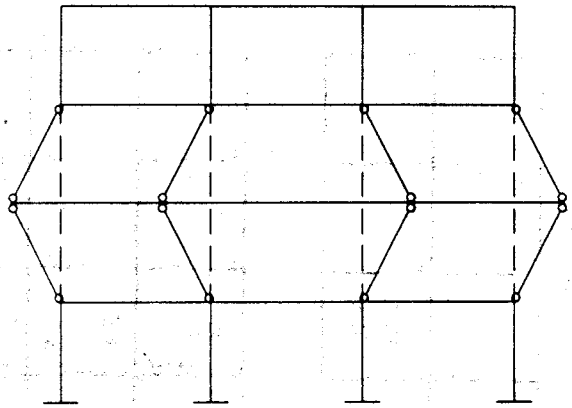


图 6.3.4　梁升温使柱端屈服

6.4　火灾下钢结构在外荷载下的内力和变形计算

6.4.1　进行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。

6.4.2　进行钢结构构件抗火验算时，受火构件在外荷载作用下的变形，可采用常温下相同荷载所产生的变形乘以一放大系数，该放大系数可取为构件常温下的弹性模量与高温下的弹性模量之比。

7 钢结构抗火验算

7.1 作用效应组合及抗火设计步骤

7.1.1 进行结构某一构件抗火验算时，可仅考虑该构件受火升温。

7.1.2 进行钢结构抗火验算时，应采用式(7.1.2)对荷载效应进行组合

$$S=\gamma_G C_G G_k+\sum\gamma_{Qi}C_{Qi}Q_{ki}+\gamma_w C_w W_k+\gamma_F C_F\triangle T \qquad (7.1.2)$$

式中 S——荷载组合效应；

G_k——永久荷载标准值；

Q_{ki}——楼面或屋面活载(不考虑屋面雪载)标准值；

W_k——风载标准值；

$\triangle T$——构件或结构的温度变化(考虑温度效应)；

γ_G——永久荷载分项系数，取 1.0；

γ_{Qi}——楼面或屋面活载分项系数，取 0.7；

γ_w——风载分项系数，取 0 或 0.3，选不利情况；

γ_F——温度效应的分项系数，取 1.0；

C_G、C_{Qi}、C_W、C_F——分别为永久荷载、楼面或屋面活载、风载和温度影响的效应系数。

7.1.3 进行钢结构构件抗火验算的一般步骤如下：

1 确定一定的防火被覆厚度；

2 按照第六章第二节有关条文计算构件在耐火时间极限条件下的内部温度；

3 按第四章有关条文确定高温下钢的材料参数，按第六章第三节和第四节有关条文计算结构构件在外荷载和温度作用下的内

力；

4 按第7.1.2条规定进行荷载效应组合；

5 根据构件和受载的类型，按第七章第二节、第三节和第四节有关条文进行构件抗火承载力极限状态验算；

6 当设定的防火被覆厚度不合适时(过小或过大)，调整防火被覆厚度，重复上述1～5步骤。

7.2 基本受力钢构件的抗火承载力极限状态验算

7.2.1 对轴心受拉钢构件，应按下式验算其抗火承载力：

$$\frac{N}{A} \leqslant \gamma_R \eta_T f \tag{7.2.1}$$

式中 N——火灾时构件所受拉力设计值；

A——构件毛截面面积；

γ_R——钢材抗火设计强度调整系数，$\gamma_R = 1.1$；

f——常温下钢材的设计强度。

7.2.2 对于轴心受压钢构件，应按下式验算其抗火承载力：

$$\frac{N}{\varphi_T \cdot A} \leqslant \gamma_R \eta_T f \tag{7.2.2-1}$$

式中 N——火灾下构件所受的轴压力设计值；

A——柱的毛截面面积；

φ_T——高温下轴心受压构件的稳定系数；

$$\varphi_T = \alpha \cdot \varphi \tag{7.2.2-2}$$

α——系数，根据构件的长细比和温度按表7.2.2确定；

φ——常温下对应长细比和截面类型的轴心受压柱的稳定系数，根据现行钢结构设计规范有关规定确定。

表 7.2.2 系数 α 的确定

构件温度℃ / 构件长细比	200	300	400	500	550	570	580	600
≤50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.96
100	1.04	1.08	1.12	1.12	1.05	1.00	0.97	0.85
150	1.08	1.14	1.21	1.21	1.11	1.00	0.94	0.74
≥200	1.10	1.17	1.25	1.25	1.13	1.00	0.93	0.68

7.2.3 对于受弯钢构件，应按下式验算其抗火承载力：

$$\frac{M_x}{\varphi_{bT}W_x}\leqslant\gamma_R\eta_T f \qquad (7.2.3-1)$$

式中 M_x——火灾下梁的最大弯矩设计值；

W_x——绕 X 轴的毛截面抵抗矩；

φ_{bT}——高温下钢梁的整体稳定系数；

$$\varphi_{bT}=\alpha_b\varphi_b \qquad (7.2.3-2)$$

α_b——系数，按式(7.2.3－3)或表 7.2.3 确定；

$$\alpha_b=1.150+0.154\sin\left(\frac{T_s}{460}\pi-0.46\pi\right) \qquad 0℃<T_S\leqslant500℃$$

$$(7.2.3-3a)$$

$$\alpha_b=1.292-0.6252\times10^{-4}(T_s-500)^2 \qquad 500℃<T_s\leqslant600℃$$

$$(7.2.3-3b)$$

当 $\varphi_{bT}>0.6$ 时，按下式将 φ_{bT} 修正为 φ'_{bT}

$$\varphi'_{bT}=1.1-0.4646/\varphi_{bT}+0.1269/\varphi_{bT}^{1.5} \qquad (7.2.3-4)$$

表 7.2.3　各温度下系数 α_b 的值

T_s(℃)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
α_b	1.052	1.060	1.069	1.078	1.087	1.097	1.107	1.117	1.127	1.138
T_s(℃)	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
α_b	1.148	1.159	1.169	1.180	1.190	1.200	1.210	1.219	1.229	1.237
T_s(℃)	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
α_b	1.246	1.254	1.261	1.268	1.275	1.281	1.286	1.291	1.295	1.298
T_s(℃)	410	420	430	440	450	460	470	480	490	600
α_b	1.300	1.302	1.304	1.304	1.304	1.303	1.301	1.299	1.296	1.292
T_s(℃)	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600
α_b	1.286	1.267	1.236	1.192	1.136	1.067	0.986	0.892	0.786	0.667

注：T_s——钢梁的平均温度；

φ_b——常温下对应长细比和截面类型的钢梁的整体稳定系数，根据现行钢结构设计规范有关规定确定。

7.2.4　对于压弯钢构件，应按下式验算其抗火承载力：

平面内：
$$\frac{N}{\varphi_{xT}A}+\frac{\beta_m M_x}{\gamma_x W_x(1-0.8N/N_{EXT})}\leqslant\eta_T\gamma_R f \qquad (7.2.4-1)$$

平面外：
$$\frac{N}{\varphi_{yT}A}+\frac{\beta_t M_x}{\varphi_{bT}W_x}\leqslant\eta_T\gamma_R f \qquad (7.2.4-2)$$

式中　N, M_x——分别为火灾下压弯构件轴力和最大弯矩设计值；

β_m, β_t——等效弯矩系数，根据现行钢结构设计规范有关规定确定；

φ_{xT}、φ_{yT}——分别为高温下弯矩作用平面内及平面外轴压件整体稳定系数；

φ_{bT}——高温下均匀受弯构件整体稳定系数，按式(7.2.3

-2)确定；

γ_x——塑性发展系数；

N_{EXT}——高温下弯矩作用平面内的欧拉临界力；

$$N_{EXT}=\frac{\pi^2 E_T}{\lambda_x^2}A \qquad (7.2.4-3)$$

λ_x——构件弯矩作用平面内柱的长细比。

7.2.5 对拉弯钢构件，应按下式验算其抗火承载力：

$$\frac{N}{A}\pm\frac{M_x}{\gamma_x W_x}\leqslant\eta_T\gamma_R f \qquad (7.2.5)$$

7.3 特定条件下钢梁、钢柱的抗火承载力极限状态验算

7.3.1 对于上翼缘有密集侧向支撑的工字形截面钢梁，应按下式验算其下翼缘在火灾下关于受弯平面外的稳定性：

$$\frac{N}{\varphi_{yT}A}\leqslant\eta_T\gamma_R f \qquad (7.3.1-1)$$

式中 N——火灾下梁的轴力设计值；

A——梁的毛截面面积；

φ_{yT}——高温下工字形截面梁下翼缘关于 y 轴的稳定系数，根据梁下翼缘的计算长度 l_0 由式(7.2.2-2)求得。梁下翼缘计算长度 l_0 由下述方法求得：

1 梁两端简支时

$$l_0=l\sqrt{\frac{1}{1+\dfrac{l^4 t_w^3}{4\pi^4 I_f h_w^3}+\dfrac{S_f q l^4}{4\pi^2 E_T I_f I}\left(\dfrac{1}{3}-\dfrac{1}{\pi^2}\right)}} \qquad (7.3.1-2)$$

式中 l_0——梁下翼缘的计算长度；

l——梁跨度；

I_f——梁下翼缘绕 y 轴的惯性矩；

I——梁绕 x 轴的惯性矩；

S_f——梁下翼缘关于 x 轴的面积矩；

t_w——梁腹板的厚度；

h_w——梁腹板的高度；

E_T——高温下钢材的弹性模量；

q——梁所受的均布荷载或等效均布荷载，非均布荷载按梁最大弯矩相等的原则等效成均布荷载。

2 梁两端固定时

$$l_0 = l\sqrt{\frac{1}{4+\frac{3l^4 t_w^3}{16\pi^4 I_f h_w^3}}} \qquad (7.3.1-3)$$

7.3.2 对于框架梁，应按下列公式进行梁机构承载力极限状态（如图 7.3.2 所示）验算：

$$\frac{B_n}{8}ql^2 \leqslant M_{PT} \qquad (7.3.2-1)$$

式中 q——作用在梁上的均布荷载设计值；

B_n——与梁端连接有关的常数，当梁两端铰接时，$B_n=1$，当梁两端刚接时，$B_n=0.5$；

M_{PT}——火灾下梁考虑温度轴力影响的塑性弯矩，按下列公式计算：

$$M_{PT}=\left[1-\frac{(2+\alpha_w)^2}{(4+\alpha_w)\alpha_w}n_T^2\right]W_p\gamma_R\eta_T f \qquad n_T \leqslant \frac{\alpha_w}{2+\alpha_w} \qquad (7.3.2-2a)$$

$$M_{PT}=\frac{2(2+\alpha_w)}{(4+\alpha_w)}(1-n_T)W_p\gamma_R\eta_T f \qquad n_T > \frac{\alpha_w}{2+\alpha_w} \qquad (7.3.2-2b)$$

其中

$$n_T=\frac{N}{A\gamma_R\eta_T f} \qquad (7.3.2-3)$$

$$\alpha_w=\frac{A_w}{A_f} \qquad (7.3.2-4)$$

式中 W_P——梁的塑性抵抗矩（单位）；

A_w——梁腹板截面面积(单位)；

A_f——一个翼缘截面面积(单位)。

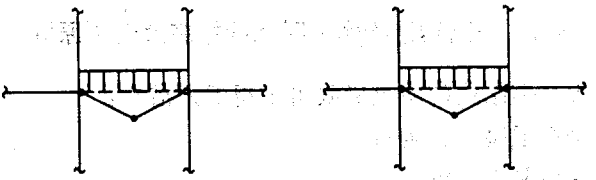


图 7.3.2　梁机构极限状态

7.3.3　对于现浇混凝土板与钢梁起组合作用的框架梁，不需验算火灾下弯矩作用平面内与平面外梁的整体稳定性。

7.3.4　对于除第 7.3.3 条规定以外的上翼缘有密集侧向支撑的框架梁，应按(7.2.4－1)式验算火灾下弯矩作用平面内的整体稳定性。

7.3.5　对于框架柱，应按下式验算火灾下框架平面内和平面外的整体稳定性：

$$\frac{N}{\varphi_T A} \leqslant 0.75\eta_T \gamma_R f \qquad (7.3.5)$$

式中　N——火灾下框架柱的轴压力设计值；

φ_T——按框架平面内或平面外柱的计算长度确定的高温下轴压构件的稳定系数的较小值。

8 钢结构防火保护构造及施工要求

8.1 提高钢结构耐火时间的措施及选用原则

8.1.1 提高钢结构的耐火极限可采用下列措施：

1 浇筑混凝土和砌筑砖块；

2 涂敷防火涂料；

3 采用轻质防火厚板包覆；

4 复合保护，即紧贴钢板用防火涂料或柔性毡状隔热材料，外用防火薄板作罩面板。

8.1.2 第8.1.1条所列措施的特点与适应范围见表8.1.2规定。

表8.1.2 四种防火保护方法特点与适应范围

方 法	特点与适用范围
浇筑混凝土 砌筑砖块法	保护层强度高、耐冲击，占用空间较大。适用于容易碰撞、无护面板的钢柱防火保护
涂敷防火涂料	重量轻、施工较简便。适用于隐蔽结构和裸露的钢梁、斜撑等钢构件
轻质防火厚板包覆法	防火厚板板面平整、装饰性好，又具有优良防火隔热性。它将防火材料与护面板合二而一，比复合结构要节省空间，特别适合在工程为交叉施工，不允许湿作业时使用
复合结构	表面有装饰要求，一般用于需要粘贴柔性毡状隔热材料或涂敷厚质防火涂料的钢柱

8.1.3 对于防火要求高，建筑重量、空间、造价受到限制情况下，应首先考虑选用防火涂料和轻质防火厚板作为钢结构防火保护措施。

8.1.4 选用钢结构防火涂料品种时，宜符合下列规定：

1 永久性防火保护的高层及多层建筑钢结构，当规定其耐火极限在1.5h以上时，应选用非膨胀型钢结构防火涂料；

2 室内裸露钢结构、轻型屋盖钢结构及有装饰要求的钢结构，当规定其耐火极限在1.5h以下时，可选用薄涂型钢结构防火涂料；

3 露天钢结构，应选用适合室外用的钢结构防火涂料。选用该品种防火涂料至少要经过一年以上室外试点工程的考验，涂层性能无明显变化；

4 耐火极限要求1.5h以上以及室外用的钢结构工程不宜使用薄涂型防火涂料。

8.2 钢结构防火保护构造

8.2.1 采用外包混凝土或砌筑砖块的防火保护构造宜按图8.2.1选用。

8.2.2 采用涂敷防火涂料的防火保护构造宜按图8.2.2选用。

8.2.3 采用防火厚板的防火保护构造宜按图8.2.3－1和图8.2.3－2选用。其中图8.2.3－1为采用龙骨的构造形式，图8.2.3－2为不用龙骨，采用自身材料为固定块(底材)辅以高温耐火胶粘剂。

8.2.4 采用复合结构的防火构造(以防火涂料或柔性隔热材料为防火材料，以防火薄板为护面板)宜按图8.2.4选用。

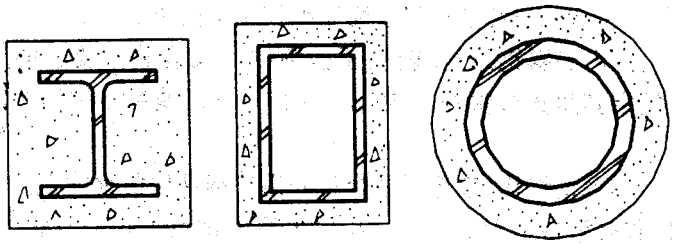
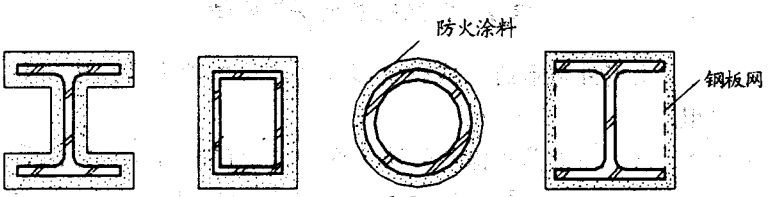
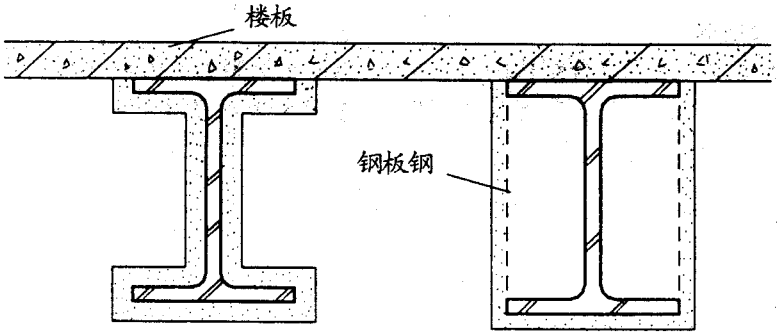


图 8.2.1　采用外包混凝土钢柱防火保护构造



(a)柱



(b)梁

图 8.2.2　采用防火涂料钢结构防火保护构造

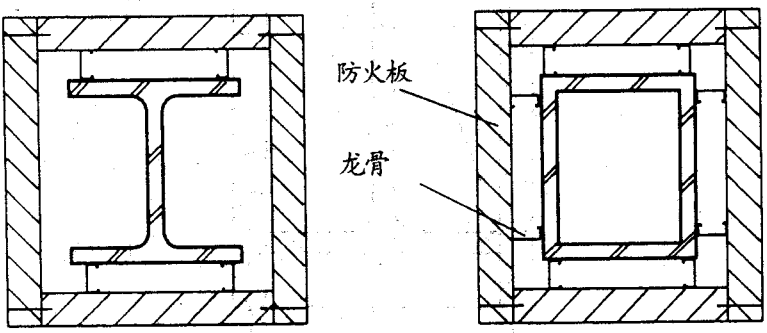
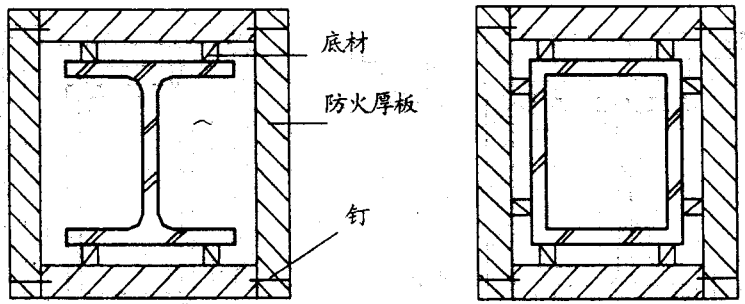
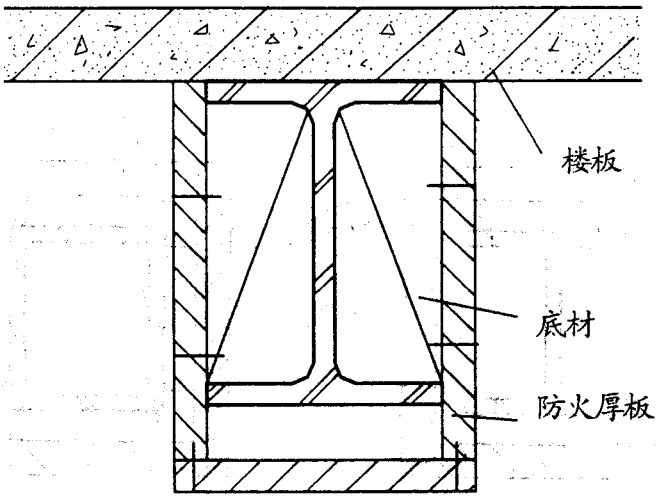


图 8.2.3－1　采用防火厚板钢结构防火构造(用龙骨为固定骨架)



(a)柱



(b)梁

图 8.2.3－2　采用防火厚板钢结构防火构造(用底材为固定块)

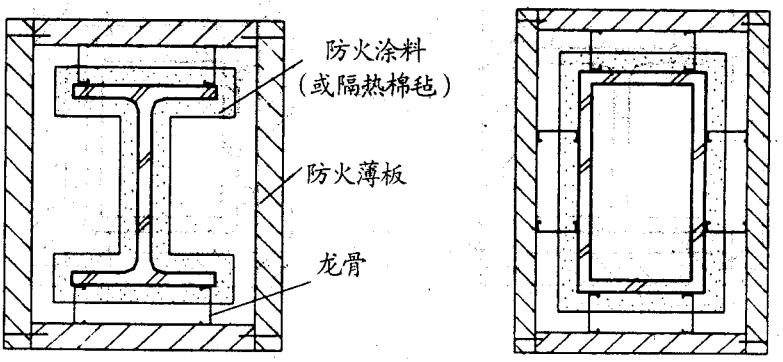


图 8.2.4　采用复合钢结构防火保护造

8.3 钢结构防火保护施工要求

8.3.1 钢结构防火涂料施工应遵守以下一般规定：

1 钢结构表面应根据使用要求进行除锈防锈处理，无防锈涂料的钢表面除锈等级应不低于 st2 级；

2 无防锈漆的钢表面，防火涂料或打底料应对钢表面无腐蚀作用；防锈漆应与防火涂料相容，不会产生皂化等不良反应；

3 严格按配合比加料和稀释剂(包括水)，使浆料稠度合宜；

4 施工过程中和涂层干燥固化前，环境温度宜保持在 5～38℃，施工时环境相对湿度不大于 90%，空气应流通。当构件表面有结露时，不宜作业。

8.3.2 薄涂型防火涂料施工应遵守以下规定：

1 薄涂型防火涂料应按装饰要求和涂料性质选择喷涂、刷涂或滚涂等施工方式；

2 薄涂型防火涂料每次喷涂厚度不应超过 2.5mm，超薄型涂料每次涂层不应超过 0.5mm，且须在前一遍干燥后方可进行后一遍施工。

8.3.3 厚涂型防火涂料施工应遵守以下规定：

1 厚涂型防火涂料可选用喷涂或手工涂抹施工；

2 厚涂型防火涂料宜用低速搅拌机，搅拌时间不宜过长，搅拌均匀即可，以免涂料中轻质骨料被过度粉碎，影响涂层质量；

3 厚涂型防火涂料每遍涂抹厚度宜为 5～10mm；必须在前一道涂层基本干燥或固化后方可进行后一道施工；

4 厚涂型防火涂料施工时一般不必加固处理，但在易受振动和撞击部件、室外钢结构幅面较大的部位或涂层厚度较大(大于 35mm)时，则应考虑加固措施，以保护涂层能长期使用。可采用增加加固焊钉或包扎镀锌铁丝网等加固措施；

5 水泥系厚质防火涂料，在天气极度干燥和阳光照射环境下

应采取必要的养护(或遮阳)措施。

8.3.4 选作室外应用的防火涂料必须具有耐水、耐候性及强度高等优良性能并经室外试点工程考验的品种。

8.3.5 采取浇筑混凝土方法用作钢结构防火保护其施工方法应按《混凝土结构工程施工及验收规范》(GB50204－92)执行。

8.3.6 防火薄板用作钢结构的护面板,如采用龙骨为固定骨架,其施工方法应按《建筑装修工程施工及验收规范》(JGJ73－91)执行。

8.3.7 采取防火厚板用作钢结构防火保护其结构构造和施工方法必须与进行耐火极限检测时的条件基本一致。

附录 A　室内火灾的升温过程

A.0.1　当能准确确定建筑室内有关参数时，可按下式确定室内火灾的空气升温过程：

$$\frac{T_g - T_g(0)}{T_{gm} - T_g(0)} = \left[\frac{t}{t_m} \cdot \exp\left(1 - \frac{t}{t_m}\right)\right]^b \qquad (A.0.1-1)$$

式中　T_g——对应 t 时刻的室内平均空气温度(℃)；

$T_g(0)$——火灾发生前的室内平均空气温度，一般取为 20℃；

T_{gm}——火灾过程中的最大室内平均空气温度(℃)；

b——参数，当 $t \leqslant t_m$ 时，取 $b = 0.8$；当 $t > t_m$ 时，取 $b = 1.6$；

t——时间(min)；

t_m——室内平均空气温度达到最大值的时间(min)；

室内平均空气温度的最大值 T_{gm}及时间 t_m 的确定与室内火灾的类型有关。

对于通风控制型火灾

$$T_{gm} = 1240 - 13.37/\eta \qquad (A.0.1-2)$$

$$t_m = \frac{0.11025 G_0}{A_w \sqrt{h_w}} \qquad (A.0.1-3)$$

式中　η——开口因子($m^{1/2}$)；

$$\eta = \frac{A_w \sqrt{h_w}}{A_t} \qquad (A.0.1-4)$$

A_t——火灾房间壁面(墙、天花和楼板，不包括开口)的面积之和(m^2)；

A_w——房间开口面积(m^2)；

h_w——开口高度(m)；

G_0——室内可燃物折合成标准木材的总质量(kg)；

对燃料控制型火灾

$$\frac{T_{gm}}{T_{gmcr}}=\left(\frac{\eta_{cr}}{\eta}\right)^{1/2} \qquad (A.0.1-5)$$

$$t_m=1.5876\frac{G_0}{A_f} \qquad (A.0.1-6)$$

$$\eta_{cr}=0.0697\frac{A_f}{A_t} \qquad (A.0.1-7)$$

$$T_{gmcr}=1240-13.37/\eta_{cr} \qquad (A.0.1-8)$$

其中 A_f——燃料表面积(m^2)；

通过下式来判断室内火灾是通风控制型还是燃料控制型

当$\frac{A_w\sqrt{h_w}}{A_f}\geqslant 0.07m^{1/2}$时，为燃料控制型火灾；

当$\frac{A_w\sqrt{h_w}}{A_f}<0.07m^{1/2}$时，为通风控制型火灾。

附录 B　标准火灾升温条件下钢构件的升温

表 B－1　标准火灾升温条件下无保护层钢构件的升温

时间 (min)	空气温度 (℃)	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。

表 B－2　标准升温条件下有保护层钢构件的升温

$d_i/\lambda_i=0.01$ ($m^2\cdot K/W$)		截面形状系数 $F_i/V(m^{-1})$											
时间 (min)	空气温度 (℃)	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

续表 B-2 标准升温条件下有保护层钢构件的升温

$d_i/\lambda_i=0.05$ ($m^2\cdot K/W$)		截面形状系数 $F_i/V(m^{-1})$											
时间 (min)	空气温度 (℃)	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

续表 B－2　标准升温条件下有保护层钢构件的升温

$d_i/\lambda_i=0.1$ ($m^2\cdot K/W$)		截面形状系数 $F_i/V(m^{-1})$											
时间 (min)	空气温度 (℃)	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

续表 B-2 标准升温条件下有保护层钢构件的升温

$d_i/\lambda_i=0.2$ ($m^2\cdot K/W$)	截面形状系数 $F_i/V(m^{-1})$											
时间 (min)	空气温度 (℃)	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

续表 B－2　标准升温条件下有保护层钢构件的升温

$d_i/\lambda_i=0.3$ ($m^2\cdot K/W$)		截面形状系数 $F_i/V(m^{-1})$											
时间 (min)	空气温度 (℃)	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

上海市工程建设规范

建筑钢结构防火技术规程

DG/TJ08－008－2000

条文说明

2000 上海

续表 B－2　标准升温条件下有保护层钢构件的升温

$d_i/\lambda_i=0.4$ ($m^2\cdot K/W$)		截面形状系数 $F_i/V(m^{-1})$											
时间 (min)	空气温度 (℃)	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

续表 B－2　标准升温条件下有保护层钢构件的升温

$d_i/\lambda_i=0.5$ ($m^2\cdot K/W$)	截面形状系数 $F_i/V(m^{-1})$											
时间 (min)	空气温度 (℃)	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C　本规程用词说明

C.0.1　执行本规程条文时，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1　表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”；

反面词采用“严禁”。

2　表示严格，在正常情况下均应这样做的：

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，在条件许可时首先应这样作的用词：

正面词采用“宜”或“可”；

反面词采用“不宜”。

C.0.2　条文中指明应按指定的标准、规范或其他有关规定执行的写法为“应按……执行”或“应符合……规定”。

非必须按现行的标准和规范执行的写法为“可参照……执行”。

目　次

1　总　则……（1）
2　符号和术语……（2）
3　钢结构耐火极限要求……（3）
3.1　建筑分类……（3）
3.2　建筑物的耐火等级……（3）
4　钢材及防火被覆材料特性……（9）
4.1　钢　材……（9）
4.2　防火涂料……（12）
4.3　防火板……（14）
4.4　其它防火隔热材料……（15）
5　钢结构抗火设计规定……（16）
5.2　钢结构抗火设计原则……（16）
6　钢结构抗火计算……（19）
6.1　室内火灾升温曲线……（19）
6.2　火灾下钢构件内部温度……（20）
6.3　火灾下钢构件温度内力及变形计算……（28）
6.4　火灾下钢结构在外荷载下的内力和变形计算……（31）
7　钢结构抗火验算……（32）
7.1　作用效应组合及抗火设计步骤……（32）
7.2　基本受力钢构件的抗火承载力极限状态验算……（32）
7.3　特定条件下钢梁、钢柱的抗火承载力极限状态验算
……（32）
8　钢结构防火保护构造及施工要求……（35）
8.1　提高钢结构耐火时间的措施及选用原则……（35）
8.2　钢结构防火保护构造……（36）

8.3 钢结构防火保护施工要求…… (36)
例题 …… (37)

1 总 则

1.0.1 本条是进行钢结构防火技术设计的目的。

1.0.2 本规程适用范围中，工业用钢结构建筑包括用于厂房、仓库等的轻型房屋钢结构。本规程不适于钢管混凝土构件。

1.0.3 本条规定主要是针对某些特殊行业(石化、核工业等)的钢结构建筑而言，因这些行业的建筑火灾危险性比一般行业大，因而对建筑结构的防火有更严格的要求，必须符合有关行业标准的规定和要求。

本规程主要参考了下列现行国家标准《建筑设计防火规范》(修订本)(GBJ16－87)、《高层民用建筑设计防火规范》(GB50045－95)、《钢结构设计规范》(GBJ17)、《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99－98)、《建筑构件耐火试验方法》(GB9978－88)、《钢结构防火涂料应用技术规范》(CECS24:90)等，同时还参考了欧盟、美国、英国、澳大利亚、日本等国家和国际组织的有关设计规范和标准。

2 符号和术语

2.2.5 本条基本引用了《建筑设计防火规范》(修订本)(GBJ16－87)中的“重要公共建筑”的名词解释，并作了原则定性，从定量来说，人员密集是指人员密度不小于0.5人/m^2，火灾荷载大是指火灾荷载大于100kg/m^2的公共建筑。

3 钢结构耐火极限要求

3.1 建筑分类

3.1.1～3.1.3 为了使用者方便起见，摘录了《建筑设计防火规范》(修订本)(GBJ16－87)和《高层民用建筑设计防火规范》(GB50045－95)中的相应条文。

3.2 建筑物的耐火等级

3.2.1 该条的单、多层建筑是指《建筑设计防火规范》(修订本)(GBJ16－87)中适用的建筑，即适用于下列新建、扩建和改建的工业与民用建筑：

一、九层及九层以下的住宅(包括底层设置商业服务网点的住宅)和建筑高度不超过24米的其他民用建筑以及建筑高度超过24米的单层公共建筑；

二、单层、多层和高层工业建筑。

本规范不适用于炸药厂(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。

该条的高层建筑是指《高层民用建筑设计防火规范》(GB50045－95)中适用的建筑，即适用于下列新建、扩建和改建的高层建筑及其裙房：

一、十层及十层以上的居住建筑(包括首层设置商业服务网点的住宅)；

二、建筑高度超过24米的公共建筑。

3.2.2 钢结构承重构件的防火保护措施主要分包敷不燃材料和喷涂防火涂料两种。包敷不燃材料包括：在钢结构外包敷防火板，砌砖、混凝土砌块，包敷柔性毡状材料等方法使其达到相应的耐火

极限。对于建筑中梁、柱等主要承重构件，且耐火极限在1.5h以上的，应采用包敷不燃材料或采用非膨胀型(即厚型)防火涂料。

3.2.3～3.2.4 《建筑设计防火规范》(修订本)(GBJ16－87)中对于乙类库房，丙类厂、库房允许三级耐火等级，因此条文中用了“不宜低于二级”。由于甲、乙类厂、库房和丙类库房的火灾危险性大，火灾荷载也大，即使设了自动喷水灭火系统，其各承重构件的耐火极限也不能降低。单层丙类厂房考虑到火灾荷载没有丙类库房大，若设了自载喷水灭火系统全保护时，对各承重构可不再做其它防火保护，该建筑的耐火等级仍可视为原耐火等级；单层、多层、高层丁、戊类厂、库房中火灾荷载小，不容易发生火灾，对其各承重构件可不再做其它防火保护。这里特别强调可视为原耐火等级，主要是考虑到厂、库房建筑耐火等级不同，防火分区允许最大占地建筑面积不同，最多允许层数也不同。

3.2.5 由于丁、戊类厂、库房火灾危险性和火灾荷载都很小，发生火灾的可能性也小，因此钢结构可不采取防火保护措施。使用甲、乙、丙类液体或可燃气体的部位，火灾危险性较大，其周围的钢结构构件，如：梁、柱等应采取防火保护措施。

3.2.6 重要公共建筑在2.2.5条中已解释。建筑中设了自动喷水灭火系统后，灭火、控火的成功率相当高，有的国家和地区、近几年来安装的自动喷水灭火系统，灭火成功率达100%，因此本《规程》根据具体情况规定设自动喷水灭火系统后，构件的耐火极限可相应降低。当个别房间采用固定气体灭火系统时，该房间中的各构件的耐火极限同样可根据相应条文降低。

3.2.7 本条中的一般公共建筑是指除了重要公共建筑以外的其它公共建筑，如人员密度小于0.5人/m^2，火灾荷载小于100kg/m^2的公共建筑。

3.2.8 本条适用于全钢结构建筑和钢筋混凝土建筑中的钢屋架承重构件。本条中的高层建筑指高层民用建筑和除丁、戊类高层

工业建筑以外的,《建规》中允许建造的其他高层工业建筑;高层建筑钢结构屋顶承重构件的屋顶层的吊顶、望板、保温材料等均应采用不燃材料。

自动喷水灭火系统保护钢屋架承重构件时,喷头宜沿着钢屋架承重结构方向布置,且布置在钢结构的上方,确保钢结构均能受到水的冷却保护,喷头的间距宜为 2.2m 左右,该系统可独立设置,也可与自动灭火系统合用。

对于丁、戊厂、库房,单、多层一般公共建筑如:游泳馆、体操馆等和住宅中的门厅、大堂等火灾危险性较小的部位,其屋顶承重构件可不采取防火保护措施。

3.2.9 这条是根据《高层民用建筑设计防火规范》(GB50045－95)中的相应要求,设了自动喷水灭火系统和自动火灾报警系统,各构件的耐火极限也不作降低。

为了设计、审核人员的方便使用,现将第 3.2.3～3.2.11 条的有关内容归纳在表 3.2.9 中,表 3.2.9 中不够明确的应以正式条文为准。

表 3.2.9　钢结构建筑的耐火等级

建筑物及火灾危险性	单、多层厂房			单、多层库房			高层工业建筑		单、多层民用建筑		高层建筑		屋顶承重构件		
	火灾危险性分类						甲、乙、丙	丁、戊	重要公共建筑	一般公共建筑	一类	二类	单层、多层甲、乙、丙类厂房和重要公共建筑	单层、多层丁、戊类厂房（库）和一般公共建筑	高层（包括裙房、中庭）
	甲、乙	丙	丁、戊	甲	乙、丙	丁、戊									
耐火等级不低于	二级	注1三级	可不作防火保护	一级	三级	可不作防火保护	注4二级	可不作防火保护	注2二级	注3二级	一级	注4二级	注5二级	可不作防火保护	注一（类）5级，二（类）级

注：1. 当单层丙类厂房中设有自动喷水灭火系统全保护时，其各构件可不采取防火保护措施，其耐火等级可视为二级。当多层丙类厂房中设自动喷水灭火系统全保护时，其柱、梁的耐火极限可按表 3.2.1 中相应的规定降低 0.5h，其耐火等级可视为二级；

2. 当建筑物中设自动喷水灭火系统全保护时，其柱、梁的耐火极限可按表 3.2.1 中的相应的规定降低 0.5h；

3. 当建筑物中设自动喷水灭火系统全保护时，其各建筑构件的耐火极限可按表 3.2.1 中相应的耐火极限降低一半；

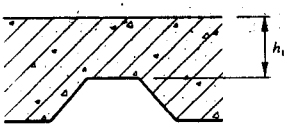
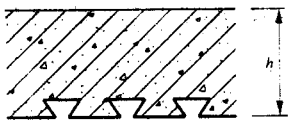
4. 当建筑物中设自动喷水灭火系统、火灾自动报警系统全保护时，其柱、梁的耐火极限可按表 3.2.1 中相应的规定降低 0.5h；

5. 当设有自动喷水灭火系统保护屋顶承重构件时，屋顶承重构件可不再采取其他防火保护措施。

3.2.11　压型钢板在楼板中的作用分两种，一种为：仅起模板作用，混凝土楼板中仍然配受力钢筋，其耐火极限应按钢筋混凝土楼板确定，压型钢板不需防火保护。另一种压型钢板既起模板作用，

又起受力筋作用的压型钢板—混凝土组合楼板要求压型钢板与混凝土必须紧密的结合在一起，二者形成不可分割的整体而共同工作，该楼板的耐火极限主要取决于压型钢板上混凝土的厚度，同时也与分布筋、压型钢板、荷载大小、边界条件等因素有关，混凝土厚度越厚，楼板整体的耐火极限就越长。上海如：金贸大厦、证券大厦、国际航运中心、规划展示中心等不少工程采用了压型钢板—混凝土组合楼板，其中金茂大厦、证券大厦中的楼板中配了受力钢筋，压型钢板仅起模板作用；而国际航运中心、规划展示中心中的压型钢板—混凝土组合楼板没有配受力钢筋，其压型钢板—混凝土组合楼板经国家固定灭火系统和耐火构件质量监督检验中心检测其耐火极限可达到 1.5h 以上。压型钢板—混凝土组合楼板在美国、澳大利亚、英国等国家应用较广泛，如凡符合美国 UL(Underwriters Laboratories Inc.) Directory 中相应耐火极限对应的技术、构造等要求施工的压型钢板—混凝土组合楼板，在世界许多国家都承认，不需另作耐火极限的检测试验。又如英国标准对于耐火极限为 1.5h 时压型钢板—混凝土组合楼板厚度有构造要求，见表 3.2.11，如混凝土厚度满足表中要求，则楼板无需采取防火保护措施。

表 3.2.11　耐火极限为 1.5h 时无保护层压型钢板—混凝土组合楼板构造要求

类　别	普　通	内扣型
图例		
楼板厚度 (mm)	$h_1 \geq 80$	$h \geq 110$

我国近几年压型钢板—混凝土组合楼板在工程中得到一些应用，但相应的研究还没跟上，若在实际工程中，符合美国 UL Directory 中的耐火极限和技术、构造要求的或符合表 3.2.11 英国标准的压型钢板—混凝土组合楼板的构造要求，可不做耐火极限的试验；否则应做试验。但试验时楼板的跨度、加载、支撑边界条件应尽量与实际建筑中一致。试验的试件不宜小于 2 个，当检测表明 2 个试件均满足耐火极限要求时，则认为该压型钢板—混凝土组合楼板满足耐火极限要求；当检测表明 2 个试件均不满足耐火极限要求时，则判定该压型钢板—混凝土组合楼板不满足耐火极限要求；如果检测表明其中 1 个试件满足要求，而另 1 个不满足要求时，应补做 1 个与前 2 个试件相同的试件，对其进行耐火时间检测，若检测结果表明该试件耐火时间满足耐火极限要求，则认为该压型钢板—混凝土组合楼板满足耐火极限要求，否则，则判定该压型钢板—混凝土组合楼板不满足耐火极限要求。需强调指出的是，在检测第 3 个试件的耐火时间时，荷载、边界条件、炉温等条件应与前 2 个试件完全相同。

3.2.12 美国堪萨斯州银行大厦及匹兹堡钢铁公司大厦对其承重空心钢构件采用独特处理，在其中灌注防冻、防腐的溶液，火灾时通过其循环吸热而保证了结构的安全。但这种保护钢结构的方法目前运用不多。

3.2.13 此条中的多层建筑的楼梯间应为封闭楼梯间，高层建筑的楼梯间应为防烟楼梯间。为确保疏散楼梯的安全，除建筑中设自动喷水灭火系统外，楼梯间和前室中也要设置自动喷水灭火系统。

4 钢材及防火被覆材料特性

4.1 钢 材

4.1.1 为便于计算，高温下钢材的物理参数均采用常数。实际上，高温下钢材的热膨胀系数、导热系数、比热等物理参数均随温度而变化。

1 热膨胀与温度的关系见表 4.1.1：

表 4.1.1 钢的平均热膨胀系数与温度的关系

钢类	在下列温度范围内的平均热膨胀系数($\times 10^{-6}$/℃)											
含碳率 C(%)	0～100	0～200	0～300	0～400	0～500	0～600	0～700	0～800	0～900	0～1000	0～1100	0～1200
0.05	12.62	13.08	13.46	13.83	14.25	14.65	15.00	14.72	12.89	13.79	14.65	15.37
0.23	12.18	12.66	13.08	13.47	13.92	14.41	14.85	12.64	12.41	13.37	14.16	14.81
0.415	11.21	12.14	13.00	13.58	14.05	14.58	14.85	12.65	12.65	13.59	14.36	15.00

也可用下式表示

$$\alpha_s = (11 + 0.062T_s) \times 10^{-6} \quad m/(m \cdot K) \quad T_s \leq 600℃ \tag{4.1.1-1}$$

2 比热与温度的关系

$$c_s = 425 + 7.73 \times 10^{-1} T_s - 1.69 \times 10^{-3} T_s^2 + 2.22 \times 10^{-6} T_s^3$$

$$J/(kg \cdot K) \quad 20℃ \leq T_s \leq 600℃ \tag{4.1.1-2a}$$

$$c_s = 666 + \frac{13002}{738 - T_s} \quad J/(kg \cdot K) \quad 600℃ \leq T_s \leq 735℃ \tag{4.1.1-2b}$$

$$c_s = 545 + \frac{17820}{T_s - 731} \quad J/(kg \cdot K) \quad 735℃ \leq T_s \leq 900℃$$

(4.1.1－2c)

$$c_s = 650 \quad J/(kg \cdot K) \quad 900℃ \leq T_s \leq 1200℃ \quad (4.1.1-2d)$$

3 导热系数与温度的关系

$$\lambda_s = 54 - 3.33 \times 10^{-2} T_s \quad W/(m \cdot K) \quad 20℃ \leq T_s \leq 800℃$$

(4.1.1－3a)

$$\lambda_s = 27.3 \quad W/(m \cdot K) \quad T_s \geq 800℃ \quad (4.1.1-3b)$$

4.1.2～4.1.3 因为国内没有系统地进行过高温下钢材的材性试验，因此，本规程所采用的高温下钢材的力学性能参数是根据国外的试验资料确定的。当构件的升温速度在5～50℃/min之间时，一般不单独考虑徐变的影响，而在弹性模量中包含了徐变的影响。在温度超过250℃，钢材的应力—应变关系曲线就没有明显的屈服平台，为简单起见，这里仍采用直线型的应力—应变关系曲线。本规程采用的是欧洲钢结构协会(ECCS)建议的高温下结构钢的屈服强度和弹性模量随温度变化的计算公式。而英国规范BS：5950Part 8采用屈服强度的定义为对应一定应变的应力值，分多个层次，表4.1.2给出了英国规范列出的高温下对应应变分别为0.5%，1.5%，2.0%的强度折减系数，供参考。

表 4.1.2　高温下钢材对应各应变的强度折减系数

钢材的温度 T_s(℃)	对应应变的强度折减系数 f_{yT}/f_y		
	0.5%	1.5%	2.0%
100	0.970	1.000	1.000
150	0.959	1.000	1.000
200	0.946	1.000	1.000
250	0.884	1.000	1.000
300	0.854	1.000	1.000
350	0.826	0.968	1.000
400	0.798	0.956	0.971
450	0.721	0.898	0.934
500	0.622	0.756	0.776
550	0.492	0.612	0.627
600	0.378	0.460	0.474
650	0.269	0.326	0.337
700	0.186	0.223	0.232
750	0.127	0.152	0.158
800	0.071	0.108	0.115
850	0.045	0.073	0.079
900	0.030	0.059	0.062
950	0.024	0.046	0.052

4.1.3　现行钢结构规范给出的常温下钢材的设计强度不是其屈服强度，而是屈服强度除以一个大于 1.0 的系数。由于火灾是小概率事件，抗火设计可直接采用屈服强度，而不采用设计强度。高温下钢材的屈服强度可利用常温下钢材的屈服强度来确定，而常

温下钢材的屈服强度可通过其设计强度乘以一个 1.1 的抗力分项系数来求得。

4.1.5 近来国内外有关于耐火钢的报道，耐火钢在高温下的力学性能优于普通结构钢，但是有关耐火钢高温下力学性能的系统的试验资料缺乏，对耐火钢在高温下的详细力学性能不了解，因此，当要采用耐火钢时，应按有关标准进行试验，以确定其在高温下的性能。

4.2 防火涂料

4.2.1 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涂料。

早在 50 年代欧美、日本等先进国家就广泛采用防火涂料保护钢结构。80 年代初期国内才开始在一些重要钢结构建筑中采用防火涂料对结构进行保护，但均采用进口防火涂料并由国外代理商进行施工。1985 年以后，国内加强了防火涂料研制工作，四川、北京、上海等地先后研制成功多种钢结构防火涂料，取代进口，应用于国内很多重要工程中，为国家节省了大量外汇和建设费用。

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，年销售量近万吨，钢结构防火工程年施工面积达百万平方米，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、应用的标准化和规范化，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》(GB14907－94)，这二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产生了显著作用。

上述标准出现于 1994 年之前，近几年国内，特别是上海地区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，规定更加具体、明确。

关于超薄型钢结构防火涂料。近几年国外一些厂商如英国 Nullifire 公司和德国 Herberts 公司生产类似于木结构上用饰面型防火涂料，但应用于钢结构，涂层厚度只需 2～3mm，即可使钢构件耐火极限达 1.5h 以上，国内称之为超薄型钢结构防火涂料。但从防火机理看仍属于膨胀型防火涂料，只不过达到同样耐火极限需要涂层较薄而已。

国内也正在研制超薄型钢结构防火涂料，但据我们所知，目前还达不到国外水平。有的耐火极限达到 1.5h 要采取辅助措施，如包裹玻璃布，有的耐水性、抗老化性较差，总之，国内目前制订超薄型钢结构防火的指标还不成熟，在本条中仅提出这一概念，而不另外分类。

4.2.2 为保证用于工程中的防火产品的可靠性，增加产品鉴定证书和企业标准的要求。此处进一步明确不论哪一类钢结构防火涂料，其产品都应通过国家指定的检测机构检测合格，才可以选用。按照国家技术监督局指定，防火涂料系由国家建材质检中心检测（地址：四川省都江堰市）。

防火涂料的导热系数是衡量其性能的一个重要参数，导热系数越小，说明其隔热性能越好。另外，进行钢结构抗火计算时，必需防火涂料的导热系数、比热和密度。以前防火涂料生产厂对其产品的性能参照提供不详尽，本规程明确提出参数要求，以使厂家注意。

关于矿物纤维不得使用干式喷涂工艺的问题。早在 50 年代日本采用喷涂石棉用作船舶防火隔热材料，到了 60 年代又广泛用作钢结构建筑的防火被覆材料，后由于欧美提出石棉粉尘会致癌问题而被禁止使用，而用矿棉代替石棉作为防火喷涂材料。矿棉是岩棉和矿渣棉的统称，日本在 70 年代在高层钢结构建筑中广泛

采用干式喷涂施工工艺，用矿棉为原料作为防火被覆材料。其密度小、施工效率较高，但是干式喷涂时会发生大量粉尘、纤维飞扬，不仅对施工人员健康造成损害，也极易造成环境污染。

国外，如英国环保部门经过长期调研证实，矿棉粉尘除会导致眼疾、皮肤病及上呼吸道病症外，长期暴露在有这种粉尘环境下的人群癌症发病率偏高，认为如采用矿棉做隔热防火材料特别要注意空调系统的设计，避免空气的流动造成棉尘散布于室内。

日本从80年代开始已逐步采用湿式矿棉喷涂代替干式矿棉喷涂。考虑到矿棉粉尘对人员健康的危害和国际上发展趋势，为此本规程对矿棉防火喷涂工艺提出限制。

4.2.4 关于室外钢结构防火涂料的技术要求问题。国内石化企业的产生装置的承重钢框架、支架、裙座、管架以及石油钻井平台等大多为室外或半室外的钢结构建(构)筑物。在这类钢结构上所用防火涂料，除与室内防火涂料具有相同耐火极限要求外，还应具有优良的耐候性。

国内尚无针对用于室外钢结构防火涂料的国家标准，但根据国内工程使用经验和国外生产厂家均认为厚质无机防火涂料中密度较高、强度较好的品种，具有优良的耐水性和抗冻性，较适合于露天钢结构中使用。

4.3 防火板

4.3.1～4.3.3 根据密度和使用厚度将防火板分防火薄板和防火厚板二大类。

防火薄板使用厚度大多在6～15mm之间，密度在800～1800kg/m^{3}之间，主要用作轻钢龙骨隔墙的面板、吊顶板，以及钢梁、钢柱经厚涂型防火涂料涂覆后的装饰面板，这类板有各种短纤维增强的水泥压力板、纤维增强的普通硅酸钙板以及各种玻璃布增强的无机板(俗称无机玻璃钢)。

防火厚板的特点是密度小(一般在 900kg/m^3 以内)、导热系数低、耐高温(使用温度可达 1000℃以上),其使用厚度可按耐火极限需要确定,大致在 12～50mm 之间,由于本身具有优良耐火隔热性,可直接用于钢结构防火,提高结构耐火时间。

防火厚板主要有硅酸钙防火板及膨胀蛭石防火板二种。

防火厚板在美、英、日等国钢结构防火工程中已大量生产、应用,例如日本钢结构防火工程中仅硅酸钙防火板(KB 板)已占防火材料总量 10%左右。但在我国这二种板生产和应用仅处于起步阶段。近几年国内使用的硅酸钙防火板均为国外产品,主要有日本 JIC 公司的 KB 板,比利时保全公司的 Promatect 板。目前国内山东莱州明发隔热材料有限公司的 GF 板,上海七宝绝热材料厂的 XT 板均属同一类型的硅酸钙防火板。其中 GF 板已正式投产。

防火厚板由于表面光滑平整、耐火性能优良,用它作防火材料不需再用防火涂料,可以完全干作业,估计它将象防火涂料一样,不久也将在国内逐步发展和广泛应用。

4.4 其它防火隔热材料

4.4.1～4.4.3 除防火涂料和防火板外,国内外曾将墙体材料和保温隔热材料用于钢结构防火保护。

5 钢结构抗火设计规定

5.2 钢结构抗火设计原则

5.2.1～5.2.2 传统的抗火设计是基于构件标准耐火试验进行的。实际上，将构件从结构中孤立出来，施加一定的荷载，然后按一定的升温曲线加温，来测定构件耐火时间的方法，存在很多问题。首先，构件在结构中的受力，很难通过试验模拟，实际构件受力各不相同，试验难以概全，而受力的大小对构件耐火时间的影响较大；其次，构件在结构中的端部约束在试验中难以模拟，而端部约束也是影响构件耐火时间的重要因素；再次，构件受火在结构中会产生温度应力，而这一影响在构件试验中也难以准确反映。正是注意到试验的上述缺陷，结构抗火设计方法已开始从基于试验的传统方法，转为基于计算的现代方法。但是钢结构抗火计算会增加结构设计人员的工作量，尤其是目前广大结构设计人员对钢结构抗火计算还不十分熟悉，因此，本规程目前只要求对一些火灾危险性大、耐火等级高的重要建筑进行抗火计算，对于一般的建筑，暂不作此要求。

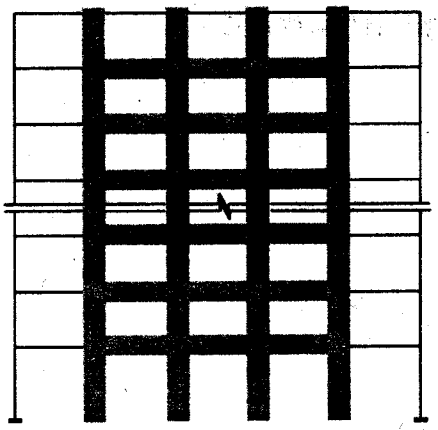
由于建筑物内火灾荷载密度越大，其火灾危险性和对结构的破坏性也越大。但目前国内还缺少各种建筑物火灾荷载密度的统计数据和资料，而国外的统计资料不能完全反映国内的实际情况。不过初步调查显示，通常情况下，一般的住宅、办公室、医院、旅馆、会议室、教室的火灾荷载密度均低于 200kg/m^2。而图书室、藏书楼、档案楼、商场、仓库等的火灾荷载密度较大，如商业楼的周转用仓库，存放有大量的可燃物品，火灾荷载密度一般为 200～500 kg/m^2；藏书楼、档案楼的火灾荷载密度一般为 400～600kg/m^2。

构件的截面形状和尺寸不同，对构件的升温有影响，进而影响

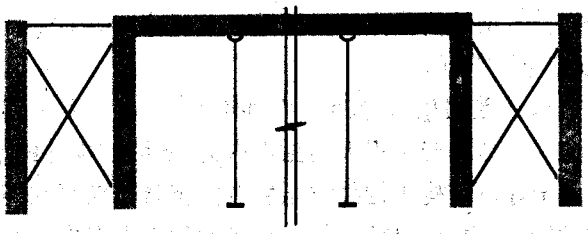
构件的耐火时间。由于同一结构各构件的截面类型与防火保护层产品标准试验时的构件不同，因此对于不同截面形式构件防火保护层厚度应按《钢结构防火涂料应用技术规范》(CECS24:94)中附录三的规定进行修正。

5.2.3 当构件受到相邻构件的约束较大时，在火灾时，随着温度的升高，构件内部将产生很大的温度内力，从而使构件的耐火时间缩短，但由于计算结构中构件的温度内力有时比较复杂，若在计算中不考虑温度内力，可以按本条规定定性的考虑温度内力的影响。

一般情况下，多、高层框架的中间柱，框架跨数不少于三跨时，位于中间跨的梁受到相邻构件的约束较大(图 5.2.3－1)；与斜支撑相连的柱，单层排架中设有不少两道抗侧移支撑时，位于侧移支撑之间的梁受到相邻构件的约束也很大(图 5.2.3－2)。



(5.2.3－1)



(5.2.3-2)

图 5.2.3 受相邻构件约束较大的构件(阴影部分)

5.2.4 由于目前国内外对火灾下各种连接的受力性能缺乏研究，这方面的资料还很少，这里暂时只作原则性规定，待将来积累研究资料和试验数据后再作修改补充。

6 钢结构抗火计算

6.1 室内火灾升温曲线

6.1.1 本规程采用的标准升温曲线为国际标准组织的 ISO834 标准升温曲线。

6.1.2 标准火灾升温曲线能在一定程度反映大多数火灾的升温过程，但影响室内火灾升温过程的因素很多，主要有：可燃物的燃烧性能、火灾荷载大小、房间通风状况、房间壁面热工性能、可燃材料的分布等，而标准火灾升温曲线不能反映这些因素的影响，要在抗火设计时完全考虑这些因素是很困难的，本条规定的方法能反映火灾荷载密度、通风状况等主要因素对室内火灾升温过程的影响。

6.1.3 本规程给出的火灾下钢构件升温计算公式或表格是按照标准火灾升温确定的，当采用实际火灾升温时，为便于设计，可采用等效曝火时间，而套用标准火灾升温下钢构件温度计算结果。

公式(6.1.3)的意义为，实际火灾升温曲线下在 t 时刻下的面积与标准火灾升温曲线在 t_e 时刻下的面积相等，见图 6.1.3。

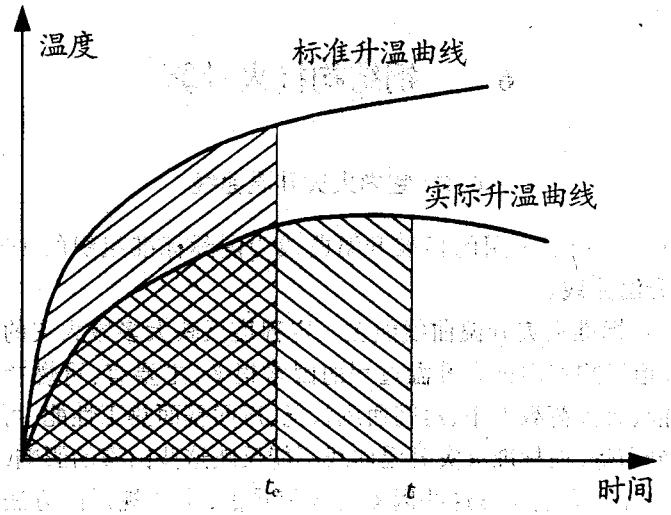


图 6.1.3 等效曝火时间

6.2 火灾下钢构件内部温度

6.2.1 轻质和非轻质保护层的区分是根据保护层本身的吸热对钢构件升温的影响程度确定的。实际上不论是轻质保护层还是非轻质保护层，保护层本身吸收的热量都对构件的升温有影响，只是轻质保护层吸收的热量相对于构件吸收的热量来说较少，为简化起见，忽略了这部分热量，其结果是使这样算得的构件温度将略微偏高。其实，适用于有非轻质保护层构件的升温计算方法也适用于有轻质保护层构件的升温计算。

6.2.2 本条所给出的计算公式为显式差分格式，物理意义上有一定的收敛条件，要求时间步长 $\triangle t$ 不能大于某一限值，该限值的大小与构件的截面特性和保护层的传热性能有关，对一般的钢构件，这个限值的数量级在 10^3s，因此比较宽松，但是 $\triangle t$ 较大时，计算结果误差较大，通常情况 $\triangle t$ 的取值不宜超过 30s。

6.2.3 对于有保护层构件，当$(\alpha_c+\alpha_r)>>\frac{\lambda_i}{d_i}$时，式(6.2.3－3)和(6.2.3－4)是足够精确的，当$(\alpha_c+\alpha_r)$与$\frac{\lambda_i}{d_i}$较接近时，即$\frac{\lambda_i}{d_i}>10$时，应考虑室内空气向构件表面的传热速度对构件升温的影响，此时构件的综合传热系数应按下式计算

构件有轻质保护层

$$B=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_c+\alpha_r}+\frac{d_i}{\lambda_i}}\cdot\frac{F_i}{V} \qquad (6.2.3-1)$$

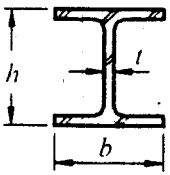
构件有非轻质保护层

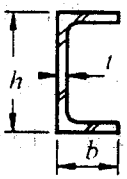
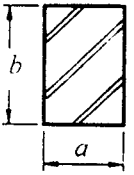
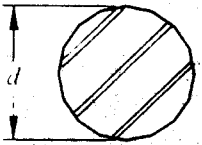
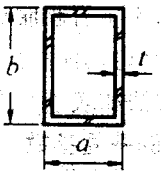
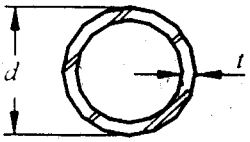
$$B=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_c+\alpha_r}+(1+\frac{c_i\rho_i d_i F_i}{2c_s\rho_s V})\frac{d_i}{\lambda_i}}\cdot\frac{F_i}{V} \qquad (6.2.3-2)$$

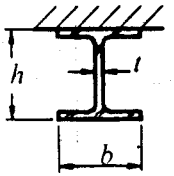
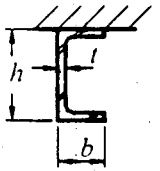
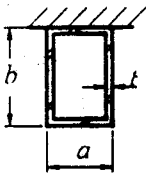
由于膨胀型防火涂料在火灾下达到一定温度时，其成分发生物理化学变化，其涂层增厚，保护层物理性质发生变化。同时，膨胀型防火涂料的膨胀发泡性能受周围环境(如湿度等)影响较大，因此，对于采用膨胀型防火保护层的钢构件的升温计算比较困难。本节给出的钢构件内部温度计算方法不适用于有膨胀型防火涂料的钢构件。在工程应用中，宜通过试验来确定其保护层厚度。

无防火保护的钢构件截面参数计算方法如表 6.2.3－1 所示。

表 6.2.3－1　无保护层构件的截面参数

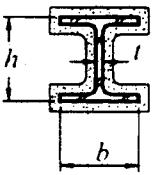
截面形状	截面参数 F/V	备　注
	$\frac{2h+4b-2t}{A}$	

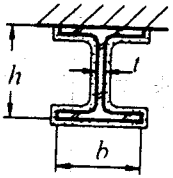
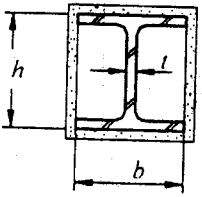
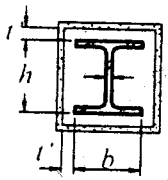
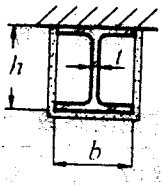
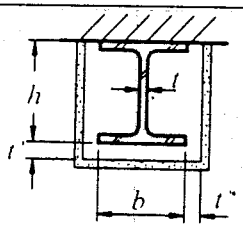
	$\frac{2h+4b-2t}{A}$	
	$\frac{2(a+b)}{a \cdot b}$	
	$\frac{4}{d}$	
	$\frac{a+b}{t(a+b-2t)}$	
	$\frac{d}{t(d-t)}$	

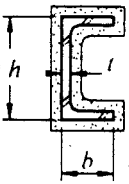
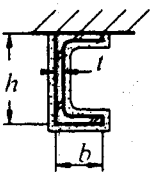
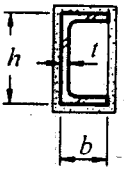
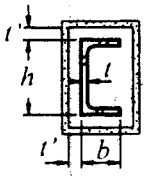
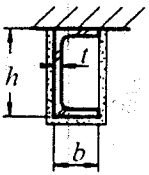
	$\frac{2h+3b-2t}{A}$	
	$\frac{2h+3b-2t}{A}$	
	$\frac{b+a/2}{t(a+b-2t)}$	

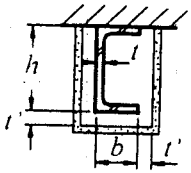
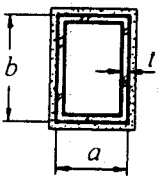
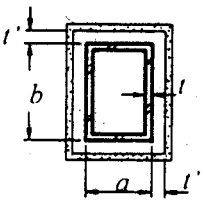
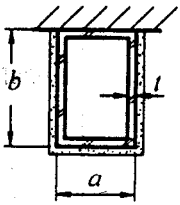
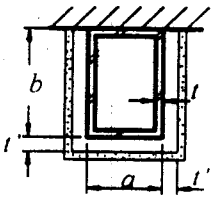
具有典型防火保护构造的钢构件截面参数计算方法如表6.2.3－2所示。

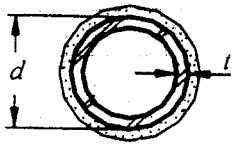
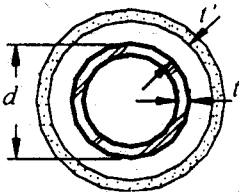
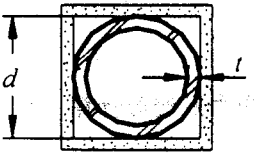
表6.2.3－2　有保护层构件的截面参数

截面形状	形状系数 F_i/V	备　注
	$\frac{2h+4b-2t}{A}$	

	$\frac{2h+3b-2t}{A}$	
	$\frac{2(h+b)}{A}$	
	$\frac{2(h+b)}{A}$	应用限制 $t' \leq \frac{h}{4}$
	$\frac{2h+b}{A}$	
	$\frac{2h+b}{A}$	应用限制 $t' \leq \frac{h}{4}$

	$\frac{2h+4b-2t}{A}$	
	$\frac{2h+3b-2t}{A}$	
	$\frac{2(h+b)}{A}$	
	$\frac{2(h+b)}{A}$	应用限制 $t' \leq \frac{h}{4}$
	$\frac{2h+b}{A}$	

	$\frac{2h+b}{A}$	应用限制 $t' \leq \frac{h}{4}$
	$\frac{a+b}{t(a+b-2t)}$	
	$\frac{a+b}{t(a+b-2t)}$	应用限制 $t' \leq \frac{h}{4}$
	$\frac{a+b/2}{t(a+b-2t)}$	
	$\frac{a+b/2}{t(a+b-2t)}$	应用限制 $t' \leq \frac{h}{4}$

	$\frac{d}{t\cdot(d-t)}$	
	$\frac{d}{t\cdot(d-t)}$	应用限制 $t'\leq\frac{h}{4}$
	$\frac{d}{t\cdot(d-t)}$	

6.2.4 该公式是从第 6.2.2 条规定的方法计算出的结果拟合得到的。

6.2.5 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 6.2.5 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。

表 6.2.5　部分防火隔热材料的含水率

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

6.3　火灾下钢构件温度内力及变形计算

6.3.1　很多结构都是超静定的。超静定结构在火灾下，由于构件温度升高，必定会在结构内产生温度内力和变形，分析表明温度内力在火灾时的构件内力中占有相当大的比例，因此，在进行钢结构抗火计算时，必须考虑温度内力和变形的影响。

6.3.2　目前结构力学分析的通用程序中一般都有计算温度内力的内容，但在运用这些程序计算温度内力时应注意，材料特性参数应采用升温后构件温度对应的特性参数。

如能准确确定相邻构件对受火构件的杆端弹性约束，则受火构件的温度内力可按下述方法进行计算(参见图 6.3.2)

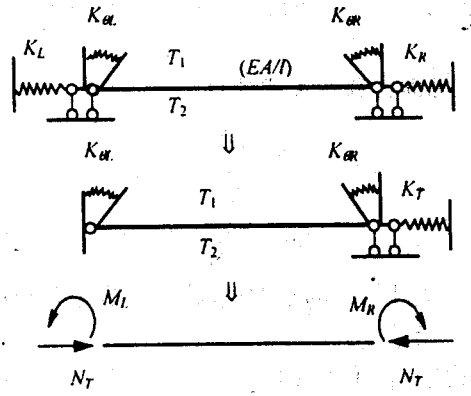


图 6.3.2　杆端带弹性约束的构件

构件的轴向温度内力按下式计算：

$$N_T=\frac{K_T}{(\frac{E_TA}{l})+K_T}(E_TA)\cdot\alpha_s\cdot(\frac{T_1+T_2}{2}-T_0) \qquad (6.3.2-1)$$

式中　K_T——构件所受的综合轴向约束刚度；

$$K_T=\frac{1}{\frac{1}{K_L}+\frac{1}{K_R}} \qquad (6.3.2-2)$$

K_L, K_R——构件两端所受的轴向约束刚度。

构件的杆端温度弯矩按下式计算：

$$M_L=\frac{K_{\theta L}\cdot(6\frac{E_TI}{l}+K_{\theta R})\frac{E_TI}{h}\alpha_s(T_2-T_1)}{12(\frac{E_TI}{l})^2+4\frac{E_TI}{l}(K_{\theta L}+K_{\theta R})+K_{\theta L}K_{\theta R}} \qquad (6.3.2-3a)$$

$$M_R=\frac{K_{\theta R}\cdot(6\frac{E_TI}{l}+K_{\theta R})\frac{E_TI}{h}\alpha_s(T_2-T_1)}{12(\frac{E_TI}{l})^2+4\frac{E_TI}{l}(K_{\theta L}+K_{\theta R})+K_{\theta L}K_{\theta R}} \qquad (6.3.2-3b)$$

式中　$K_{\theta L}$, $K_{\theta R}$——构件两端所受的转动约束刚度。

杆端带弹性约束的构件的杆端温度变形按下述方法进行计算：

构件两端的轴向位移按下式计算

$$x_L = -\frac{N_T}{K_L} \qquad (6.3.2-4a)$$

$$x_R = -\frac{N_T}{K_R} \qquad (6.3.2-4b)$$

式中 x_L, x_R——构件两端的轴向位移，“－”表示与相应杆端力方向相反。

构件两端的转角按下式计算：

$$\theta_L = -\frac{M_L}{K_{\theta L}} \qquad (6.3.2-5a)$$

$$\theta_R = -\frac{M_R}{K_{\theta R}} \qquad (6.3.2-5b)$$

式中 θ_L, θ_R——构件两端的转角，“－”表示与相应杆端力方向相反。

如按上述方法计算温度内力和变形，应将受火柱的综合约束刚度乘以 0.7 的折减系数，然后按式(6.3.2－1)计算受火柱的轴向温度内力。

6.3.3 在计算柱的温度内力时，为简单起见，可仅考虑该柱升温，相邻柱温度不升高。实际上，火灾发生后，处于同一个着火空间内的所有柱的温度都会升高，不考虑这种影响使温度计算内力偏大，造成防火保护层过厚而造成浪费。但升温的速度可能不完全相同，为偏于安全考虑，这里仅考虑相邻柱升温为被计算柱的 30%，在这个范围内，相邻柱的温度不会超过 200℃，其材料特性与常温下相比，变化很小，因此，可以将柱的计算温度的内力直接折减 30%。

对于钢梁，由于火灾一般发生在一个楼层内，因为有楼板的分

隔，蔓延到相邻的层需要比较长的时间，因此在计算温度内力时可以只考虑该梁升温，忽略相邻层梁升温的影响。

6.4 火灾下钢结构在外荷载下的内力和变形计算

6.4.1～6.4.2 火灾下，随着钢构件温度的升高，构件的材料参数特性发生变化，则结构中该构件的内力与变形也会发生变化。但为了避免结构抗火计算附加过大的计算工作量，经理论与实际算例分析，发现可略偏于保守的采用常温下的构件的内力与变形结果推断火灾下的相应数值。

7 钢结构抗火验算

7.1 作用效应组合及抗火设计步骤

7.1.1 一般情况下，单个构件受火升温对构件的抗火不利。

7.1.2 考虑到火灾是小概率事件，因此在进行荷载效应组合时，楼面或屋面活荷载和风荷载予以折减。

7.2 基本受力钢构件的抗火承载力极限状态验算

7.2.1～7.2.5 由于高温下结构钢的极限强度与本规程中的屈服强度(对应应变0.5%)的比值都大于常温下极限强度与设计强度的比值，因此在满足常温下设计条件的前提下，不必验算高温下构件的净截面强度，但要求连接节点处保护层的厚度不小于被连接构件中较厚保护层的厚度。

本规程中各种钢构件的抗火验算公式的推导采用与常温下现行钢结构规范中相应验算公式相同的原理，但在材料强度，弹性模量及稳定系数等方面考虑了温度的影响，给出的构件抗火验算公式也与常温下相应验算公式形式一致，便于设计人员掌握与应用。具体推导过程可以参考李国强等的论著：高温下轴心受压钢构件的极限承载力(建筑结构，1993年第9期)，钢梁抗火计算与设计的实用方法(工业建筑，1994年第7期)，钢柱抗火计算与设计的实用方法(工业建筑，1995年第2期)，钢结构抗火计算与设计(中国建筑工业出版社，1999年6月)。

7.3 特定条件下钢梁、钢柱的抗火承载力极限状态验算

7.3.1 由于在以往发生的火灾中，常出现钢框架的下翼缘失稳扭曲破坏现象，因此要求验算火灾中上翼缘无侧移的工字形截面梁

下翼缘的稳定性，具体推导过程可以参考李国强等的文章：局部火灾下钢框架中上翼缘无侧移工字梁的极限状态计算（建筑结构学报，1997 年第 4 期）。验算时，梁的腹板高度取值如图 7.3.1 所示。

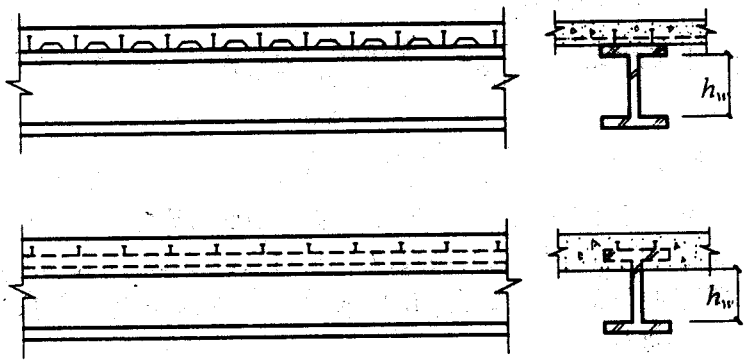


图 7.3.1　组合楼板及钢梁的腹板计算高度

7.3.3　本条文规定的框架梁应按第 7.3.1 条和第 7.3.2 条分别进行下翼缘受弯平面外的稳定性验算和梁机构承载力极限状态验算。

7.3.4　本条文是针对上面铺有钢板、钢板网、钢筋网及通过点焊与钢梁连接的预制板等的框架梁而制订的。钢板、钢板网、钢筋网、预制板等对钢梁能起侧向支撑作用，但板、网等平面外的刚度可忽略，而通过点焊与钢梁连接的预制板对钢梁平面内的变形不能起约束作用。符合本条文规定的框架梁还应按第 7.3.1 条和第 7.3.2 条分别进行下翼缘受弯平面外的稳定性验算和梁机构承载力极限状态验算。

7.3.5 一般框架柱受火时，相邻框架梁也会受影响而升温膨胀使框架柱受弯。分析表明，框架柱很可能因框架梁的受火温度效应而受弯屈服，为便于框架柱抗火设计，可偏于保守地假设柱两端屈服(参见图 6.3.4)，而验算火灾下框架柱平面内和平面外整体稳定。注意到此时柱两端屈服，且弯曲曲率相反，验算式(7.2.4－1)、(7.2.4－2)分别成为

平面内稳定 $$\frac{N}{\varphi_{xT}A}+\frac{\beta_m\gamma_R\eta_T f}{1-0.8\dfrac{N}{N_{EXT}}}\leq\eta_T\gamma_R f \qquad (7.3.5-1)$$

平面外稳定 $$\frac{N}{\varphi_{yT}A}+\frac{\beta_t\gamma_R f}{\varphi_{bT}}\leq\gamma_R\eta_T f \qquad (7.3.5-2)$$

由于框架柱的长细比一般较小，而两端反向等弯矩条件下 β_m 和 β_t 的平均值约为 0.23，则式(7.3.5－1)、(7.3.5－2)左端的第二项可近似取为 $0.25\gamma_R\eta_T f$，故框架柱的抗火验算可仅按式(7.3.5)进行。

8 钢结构防火保护构造及施工要求

8.1 提高钢结构耐火时间的措施及选用原则

8.1.1 本节所规定钢结构防火方法为应用最多的外包层法，不包括在空心截面的钢构件内充分的水冷却法和在钢构件的迎火面设置阻火隔板的屏蔽法。

8.1.2 根据厚型和薄型二类防火涂料的性能特点而决定其用途。一般薄涂型钢结构防火涂料涂层薄、重量轻、有较好的装饰性，适用于耐火极限要求低，但装饰性要求高的轻型裸露构件，而厚质防火涂料不燃、无毒、耐老化、耐久性可靠、耐火极限可达 3h 以上，适用于永久性建筑中。

近几年在室外钢结构防火工程中防火涂料发生风化变黄、起壳脱落，失去防火保护作用的质量事故屡见不鲜，究其原因除施工不当外，其主要原因是不少工程把技术性能仅能满足室内的薄涂型防火涂料用于室外，或厂家虽声称为室外用的薄涂型防火涂料，实际上并不能耐老化。由于室外环境要比室内严酷得多，涂料在室外要经受日晒雨淋风吹冰冻，故应选择耐水、耐冻融、耐老化、强度高的防火涂料。在室外用钢结构防火涂料国家标准没有明确之前，国内的防火涂料老化性能试验有一定局限性情况下，强调室外用防火涂料必须至少超过一年以上室外工程试点的考验，涂层依然良好的品种，方可推广使用，其目的是要求某些新品种防火涂料不要急于大面积推广使用，避免造成不必要的损失。

目前膨胀型防火涂料与非膨胀型防火涂料相比，其耐火极限很难达到 2h，即使达到 2h，但重复性差，故规定膨胀型防火涂料不适合用于耐火极限要求 2h 以上的工程。另外，根据调查，大多数膨胀型防火涂料老化性能较差，寿命一般在 5～10 年，有的甚至只

有3～5年就失去膨胀性能，不能再起到防火保护作用。基于膨胀型防火涂料寿命问题，要求在超过使用期限后必须重新涂刷防火涂料。

8.2 钢结构防火保护构造

8.2.3 国内缺乏防火厚板的应用实例，这里是参考日本KB板和英国Vicnclad板施工介绍而规定的。

8.3 钢结构防火保护施工要求

8.3.1～8.3.7 本节所规定的钢结构防火涂料施工要求及验收方法主要参考《钢结构防火涂料应用技术规范》(CECS24:90)及近几年工程实践的经验教训而制定的。

针对目前防火涂料施工中出现的质量问题，必须加强工程质量检测和监督，本规范提出对于上海市重要钢结构防火保护工程中在施工阶段和竣工验收时，除上海消防监督部门外，还应有上海市建筑工程质量检测部门参加进行防火涂料工程质量验收，以保证工程质量。

例　题

一、第7章例题—钢梁抗火设计例题

(一)简支梁(无温度内力)

已知条件：

1.几何尺寸

$A=9376mm^2$　$I_x=4.0\times10^8mm^4$　$I_y=1.869\times10^7mm^4$

$i_x=206.55mm$　$i_y=44.65mm$

$W_x=1.6\times10^6mm^3$　　$W_{px}=1.829\times10^6mm^3$

$W_y=1.869\times10^5mm^3$　　$W_{py}=2.876\times10^5mm^3$

2.常温材性

$E=2.06\times10^5MPa$　$f=215MPa$　$\rho_s=7850kg/m^3$

$C_s=600J(kg\cdot K)$　$\lambda_s=45.0W/(mK)$

$\alpha_s=14\times10^{-6}m/(mK)$

3.涂料参数

$\rho_i=480kg/m^3$　$C_i=1000J(kgK)$　$\lambda_i=0.105W/(mK)$

$V=9376\times10^{-6}m^3/m$　$F_i=1584\times10^{-3}m^2/m$(三面受火)

4.荷载及应力水平

恒载标准值：12.4kN/m

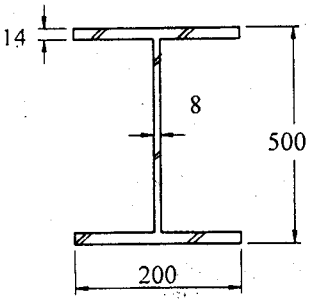
活载标准值：10.8kN/m

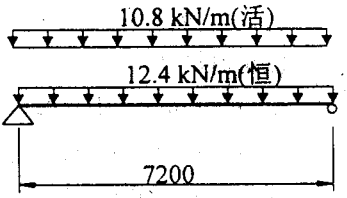
设计弯矩：$M=(1.2\times12.4+1.4\times10.8)\times7.2^2/8$

$=194.4(kN\cdot m)$

稳定系数 $\varphi_b=0.614$(见后面)

应力水平 $\dfrac{194.4\times10^6}{0.614\times1.6\times10^6\times215}=0.92$





抗火验算

对梁上翼缘没有铺板(中间设有一个侧向支撑)的简支梁,只需进行整体稳定计算。

1.计算耐火时间为 2.0 小时梁的温度

初步选定保护层厚度 $d_i = 30mm$

$$\rho_s VC_s = 7850 \times 9376 \times 10^{-6} \times 600 = 4.416 \times 10^4 (J/mK)$$

$$2\rho_i C_i F_i d_i = 2 \times 480 \times 1000 \times 1584 \times 10^{-3} \times 0.03$$

$$= 4.562 \times 10^4 (J/mK) > \rho_s VC_s$$

保护层为非轻质保护层

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

$$= \frac{1}{1 + \frac{2.281 \times 10^4}{2 \times 4.416 \times 10^4}} \cdot \frac{0.105}{0.03} \cdot \frac{1584 \times 10^{-3}}{9.376 \times 10^{-6}}$$

$$= 470.0$$

受火 2.0 小时梁的温度为

$T_s=(\sqrt{0.044+5\times10^{-5}\times470}-0.2)\times2\times3600+20$

$=450.6(℃)$

2.钢的高温材性

$\chi_T=0.743\quad E_T=0.743\times2.06\times10^5=1.53\times10^5 MPa$

$\eta_T=0.568$

3.内力组合

	组合系数	跨中弯矩 M(kN·m)
恒载	1.0	$1.0\times12.4\times7.2^2/8=80.4$
活载	0.7	$0.7\times10.8\times7.2^2/8=49.0$
风载	0.3	0.0
温度内力	1.0	0.0
组合内力		129.4

4.梁整体稳定性验算

$l_{0y}=7200/2=3600\qquad \lambda_y=\frac{l_{0y}}{i_y}=\frac{3600}{44.65}=80.63$

$\zeta=\frac{l_1t_1}{b_1h}=\frac{7200\times14}{200\times500}=1.01<2$

$\beta_b=0.69+0.13\times1.01=0.821$

$\varphi_b=\frac{0.821\times4320}{80.63^2}\cdot\frac{9376\times500}{1.6\times10^6}\sqrt{1+\left(\frac{80.63\times14}{4.4\times500}\right)^2}=0.614$

查表 7.2.3　$\alpha_b=1.304$

$\varphi_{bT}=\alpha_b\cdot\varphi_b=1.304\times0.614=0.8>0.6$

$\varphi'_{bT}=1.1-0.4646/0.8+0.1269/0.5^{1.5}=0.697$

$$\frac{M_x}{\varphi_{bT}W_x}=\frac{129.4\times10^6}{0.697\times1.6\times10^6}$$

$$=116.0<\eta_T\gamma_R f=0.568\times1.1\times215=134.3$$

满足条件

取该梁保护层厚度为 $d_i=30mm$。

(二)轴向有约束梁(考虑温度内力)

已知条件：

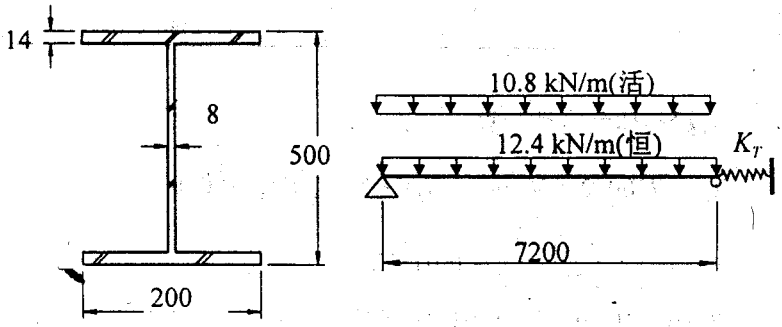
1.轴向约束刚度 K_T

$$K_T=\frac{EA}{l}\times10\%$$

$$=\frac{2.06\times10^5\times9376}{7200}\times10\%$$

$$=2.683\times10^4(N/mm)$$

2.其它已知条件同简支梁



抗火验算

情况Ⅰ　对梁上翼缘没有密集侧向支撑(中间设有一个侧向支撑)的约束梁,需进行以下三种验算：

(1)平面内整体稳定性验算

(2)平面外整体稳定性验算

(3)梁机构极限状态验算

1.计算耐火时间为 2.0 小时梁的温度

初步选定保护层厚度 $d_i=50mm$

$\rho_s VC_s=7850\times9376\times10^{-6}\times600=4.416\times10^4$

$2\rho_i C_i F_i d_i=2\times480\times10^3\times1584\times10^{-3}\times0.05$

$=7.6\times10^4>\rho_s VC_s$

保护层为非轻质保护层

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

$$=\frac{1}{1+\frac{3.8\times10^4}{2\times4.416\times10^4}}\cdot\frac{0.105}{0.05}\cdot\frac{1584\times10^{-3}}{9376\times10^{-6}}$$

$=248.1$

受火 2.0 小时梁的温度

$$T_s=(\sqrt{0.044+5\times10^{-5}\times248.1}-0.2)\times2\times3600+20$$

$=290.0(℃)$

2.该温度时钢的材性：

$\chi_T=0.922\qquad\eta_T=0.79$

$E_T=0.922\times2.06\times10^5=1.9\times10^5(MPa)$

3.温度内力

$$N_T=\frac{K_T}{\frac{E_T A}{l}+K_T}E_T A\alpha_s(T_s-20)$$

$$=\frac{2.683\times10^4}{\frac{1.9\times10^5\times9376}{7200}+2.683\times10^4}\cdot1.9\times10^5\times9376\times1.4$$

$\times10^{-5}(290-20)$

$=658.8(kN)$

4.内力组合

	组合系数	跨中弯矩 M(kN－m)	轴力(kN)
恒载	1.0	$1.0\times12.4\times7.2^2/8=80.4$	0.0
活载	0.7	$0.7\times10.8\times7.2^2/8=49.0$	0.0
风载	0.3	0.0	0.0
温度内力	1.0	0.0	658.8
组合内力		129.4	658.8

5.平面内整体稳定性验算

$$\lambda_x=\frac{l_{0x}}{i_x}=\frac{7200}{206.5}=34.9 \qquad \varphi_x=0.918$$

查表 7.2.2 $\alpha=1.0$ $\varphi_{xT}=\alpha\varphi_x=0.918$

$$N_{ExT}=\frac{\pi^2E_TA}{\lambda_x^2}=\frac{\pi^2\times1.9\times10^5\times9376}{34.9^2}=1.446\times10^7(kN)$$

$$\frac{N}{\varphi_{xT}A}+\frac{\beta_mM_x}{\gamma_xW_x(1-0.8N/N_{EXT})}$$

$$=\frac{658.8\times10^3}{0.918\times9376}$$

$$+\frac{0.65\times129.4\times10^6}{1.05\times1.6\times10^6(1-0.8\times658.8\times10^3/1.38\times10^7)}$$

$$=76.6+0.65\times80.8$$

$$=129.12<\eta_T\gamma_Rf=0.79\times1.1\times215=186.8(MPa)$$

满足要求

6.平面外整体稳定性验算

$$l_{0y}=7200/2=3600\longrightarrow\lambda_y=\frac{3600}{44.65}=80.63 \qquad \varphi_y=0.687$$

$\alpha=1.0$ $\varphi_{yT}=\alpha\varphi_y=0.687$

由前面可知，$\varphi_b=0.614$

查表 7.2.3　$\alpha_b=1.229$，$\varphi_{bT}=1.229\times0.614=0.755$

$$\varphi_{bT}=1.1-0.4646/0.755+0.1269/0.755^{1.5}=0.680$$

$$\frac{N}{\varphi_{yT}A}+\frac{\beta_t M_x}{\varphi_{bT}W_x}=\frac{658.8\times10^3}{0.687\times9376}+\frac{0.65\times129.4\times10^6}{0.68\times1.6\times10^6}$$

$$=102.3+77.3$$

$$=179.6<\eta_T\gamma_R f=186.8(\text{MPa})$$

满足要求

7.梁机构极限状态验算

$$q=1.0\times12.4+0.7\times10.8=20.0\text{kN/m}$$

$$n_T=\frac{N}{\gamma_R\eta_T fA}=\frac{658.8\times10^6}{1.1\times0.79\times215\times9376}=0.376$$

$$\alpha_w=\frac{A_w}{A_f}=\frac{472\times8}{200\times14}=1.35\Rightarrow\frac{\alpha_w}{2+\alpha_w}=0.4>n_T$$

由式(7.3.2－2)

$$M_{PT}=[1-\frac{(2+\alpha_w)^2}{(4+\alpha_w)\alpha_w}\cdot n_T^2]W_{px}\gamma_R\eta_T f$$

$$=[1-\frac{(2+1.35)^2}{(4+1.35)\times1.35}\times0.376^2]\times1.829\times10^6\times1.1\times0.79\times215$$

$$=266.54>\frac{B_n}{8}ql^2=\frac{1}{8}\times20\times7.2^2=129.6(\text{kN}\cdot\text{m})$$

满足要求

取该梁保护层厚度为 $d_i=50$mm。

情况Ⅱ　对上翼缘有密集侧向支撑的梁，需进行下列三种验算：

(1)平面内整体稳定性验算

(2)下翼缘平面外稳定验算

(3)梁机构极限状态验算

1.计算耐火时间为2.0小时梁的温度

初步选定保护层厚度 $d_i=40mm$

$\rho_s VC_s=7850\times9376\times10^{-6}\times600=4.416\times10^4$

$2\rho_i C_i F_i d_i=2\times480\times10^3\times1584\times10^{-3}\times0.04$

$=6.083\times10^4>\rho_s VC_s$

保护层为非轻质保护层

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

$$=\frac{1}{1+\frac{3.042\times10^4}{2\times4,416\times10^4}}\cdot\frac{0.105}{0.04}\cdot\frac{1584\times10^{-3}}{9376\times10^{-6}}=329.86$$

受火2.0小时梁的温度

$$T_s=(\sqrt{0.044+5\times10^{-5}\times329.86}-0.2)\times2\times3600+20$$

$=350.9(℃)$

2.该温度时钢的材性

$\chi_T=0.88\qquad\eta_T=0.715$

$E_T=0.88\times2.06\times10^5=1.813\times10^5(MPa)$

3.温度内力

$$N_T=\frac{K_T}{\frac{E_T A}{l}+K_T}E_T A\alpha_s(T_s-20)$$

$$=\frac{2.683\times10^4}{\frac{1.813\times10^5\times9376}{7200}+2.683\times10^4}\times1.813\times10^5\times9376$$

$\times1.4\times10^{-5}(350.9-20)$

$=803.6(kN)$

4.内力组合

	组合系数	跨中弯矩 M(kN－m)	轴力(kN)
恒载	1.0	$1.0\times12.4\times7.2^2/8=80.4$	0.0
活载	0.7	$0.7\times10.8\times7.2^2/8=49.0$	0.0
风载	0.3	0.0	0.0
温度内力	1.0	0.0	803.6
组合内力		129.4	803.6

5.平面内整体稳定性验算

$$\lambda_x=\frac{l_{0x}}{i_x}=\frac{7200}{206.5}=34.9 \qquad \varphi_x=0.918$$

查表 7.2.2　$\alpha=1.0$　$\varphi_{xT}=\alpha\varphi_x=0.918$

$$N_{ExT}=\frac{\pi^2E_TA}{\lambda_x^2}=\frac{\pi^2\times1.813\times10^5\times9376}{34.9^2}=1.38\times10^7(\text{kN})$$

$$\frac{N}{\varphi_{xT}A}+\frac{\beta_mM_x}{\gamma_xW_x(1-0.8N/N_{EXT})}$$

$$=\frac{803.6\times10^3}{0.918\times9376}$$

$$+\frac{0.65\times129.4\times10^6}{1.05\times1.6\times10^6(1-0.8\times803.6\times10^3/1.38\times10^7)}$$

$$=93.4+0.65\times80.8$$

$$=145.92<\eta_T\gamma_Rf=0.715\times1.1\times215=169.7(\text{MPa})$$

满足要求

6.下翼缘平面外稳定验算

$$I_f=\frac{1}{12}\times14\times200^3=9.33\times10^6(\text{mm}^4)$$

$$S_f=200\times14\times243=6.8\times10^5(\text{mm}^3)$$

$l_0 = 7200$

$$\times \sqrt{\frac{1}{1+\frac{7200^4\times 8^3}{4\pi^4\times 9.33\times 10^6\times 472^3}+\frac{6.8\times 10^5\times 20\times 7200^4(1/3-1/\pi^2)}{4\pi^2\times 1.813\times 10^5\times 9.33\times 10^6\times 4\times 10^8}}}$$

$= 3246(\text{mm})$

$$i_{fy} = \sqrt{\frac{I_f}{A_f}} = \sqrt{\frac{9.33\times 10^6}{200\times 14}} = 57.72(\text{mm})$$

$$\lambda_{fy} = \frac{l_0}{i_{fy}} = \frac{3246}{57.72} = 56.24 \longrightarrow \varphi_y = 0.827$$

$\alpha = 1.0 \qquad \varphi_{yT} = \alpha\varphi_y = 0.827$

由式(7.3.1－1)

$$\frac{N}{\varphi_{yT}A} = \frac{803.6\times 10^3}{0.827\times 9376}$$

$= 103.6 < \eta_T\gamma_R f = 0.715\times 1.1\times 215 = 169.1(\text{MPa})$

满足要求

7.梁机构极限状态验算

$q = 1.0\times 12.4 + 0.7\times 10.8 = 20.0\text{kN/m}$

$$n_T = \frac{N}{\gamma_R\eta_T fA} = \frac{803.6\times 10^6}{1.1\times 0.715\times 215\times 9376} = 0.507$$

$$\alpha_w = \frac{A_w}{A_f} = \frac{472\times 8}{200\times 14} = 1.35 \longrightarrow \frac{\alpha_w}{2+\alpha_w} = \frac{1.35}{2+1.35} = 0.4 < n_T$$

由式(7.3.2－2)

$$M_{pT} = \frac{2(2+\alpha_w)}{4+\alpha_w}(1-n_T)W_p\gamma_R\eta_T f$$

$$= \frac{2(2+1.35)}{4+1.35}(1-0.507)\times 1.829\times 10^6\times 1.1\times 0.715\times 215$$

$$= 190.95 > \frac{B_n}{8}ql^2 = \frac{1}{8}\times 20\times 7.2^2 = 129.6(\text{kN}-\text{m})$$

满足要求

取该梁保护层厚度为 $d_i=40mm$。

情况Ⅲ　对与混凝土板起组合作用的梁，需进行两种验算：

(1)下翼缘平面外稳定验算

(2)梁机构极限状态验算

1.计算耐火时间为 2.0 小时梁的温度

初步选定保护层厚度 $d_i=35mm$

$$\rho_s VC_s=7850\times9376\times10^{-6}\times600=4.416\times10^4$$

$$2\rho_i C_i F_i d_i=2\times480\times10^3\times1584\times10^{-3}\times0.035$$

$$=5.32\times10^4>\rho_s VC_s$$

保护层为非轻质保护层

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

$$=\frac{1}{1+\frac{2.661\times10^4}{2\times4.416\times10^4}}\cdot\frac{0.105}{0.035}\cdot\frac{1584\times10^{-3}}{9376\times10^{-6}}$$

$$=389.5$$

受火 2.0 小时梁的温度

$$T_s=(\sqrt{0.044+5\times10^{-5}\times389.5}-0.2)\times2\times3600+20$$

$$=394.0(℃)$$

2.该温度时钢的材性

$$\chi_T=0.834\qquad\eta_T=0.66$$

$$E_T=0.834\times2.06\times10^5=1.718\times10^5(MPa)$$

3.温度内力

$$N_T=\frac{K_T}{\frac{E_T A}{l}+K_T}E_T A\alpha_s(T_s-20)$$

$$=\frac{2.683\times10^4}{\frac{1.718\times10^5\times9376}{7200}+2.683\times10^4}\cdot1.718\times10^5\times9376\times$$

$$1.4\times10^{-5}(394-20)$$

$$=903.2(\text{kN})$$

4.内力组合

	组合系数	跨中弯矩 M(kN－m)	轴力(kN)、
恒载	1.0	$1.0\times12.4\times7.2^2/8=80.4$	0.0
活载	0.7	$0.7\times10.8\times7.2^2/8=49.0$	0.0
风载	0.3	0.0	0.0
温度内力	1.0	0.0	903.2
组合内力		129.4	903.2

5.下翼缘平面外稳定验算

$$I_f=\frac{1}{12}\times14\times200^3=9.33\times10^6(\text{mm}^4)$$

$$S_f=200\times14\times243=6.8\times10^5(\text{mm}^3)$$

$$l_0=7200$$

$$\times\sqrt{\frac{1}{1+\dfrac{7200^4\times8^3}{4\pi^4\times9.33\times10^6\times472^3}+\dfrac{6.8\times10^5\times20\times7200^4(1/3-1/\pi^2)}{4\pi^2\times1.718\times10^5\times9.33\times10^6\times4\times10^8}}}$$

$$=3239.4(\text{mm})$$

$$i_{fy}=\sqrt{\frac{I_f}{A_f}}=\sqrt{\frac{9.33\times10^6}{200\times14}}=57.72(\text{mm})$$

$$\lambda_{fy}=\frac{l_0}{i_{fy}}=\frac{3239.4}{57.72}=56.1\longrightarrow\varphi_y=0.828$$

$$\alpha=1.0\qquad\varphi_{yT}=\alpha\varphi_y=0.828$$

由式(7.3.1－1)

$$\frac{N}{\varphi_{yT}A}=\frac{903.2\times10^3}{0.828\times9376}$$

$$=116.34<\eta_T\gamma_R f=0.66\times1.1\times215=156.1(\text{MPa})$$

满足要求

7.梁机构极限状态验算

$$q=1.0\times12.4+0.7\times10.8=20.0\text{kN/m}$$

$$n_T=\frac{N}{\gamma_R\eta_T fA}=\frac{903.2\times10^6}{1.1\times0.66\times215\times9376}=0.62$$

$$\alpha_w=\frac{A_w}{A_f}=\frac{472\times8}{200\times14}=1.35\longrightarrow\frac{\alpha_w}{2+\alpha_w}=\frac{1.35}{2+1.35}=0.4<n_T$$

由式(7.3.2-2)

$$M_{pT}=\frac{2(2+\alpha_w)}{4+\alpha_w}(1-n_T)W_p\gamma_R\eta_T f$$

$$=\frac{2(2+1.35)}{4+1.35}(1-0.62)\times1.829\times10^6\times1.1\times0.66\times215$$

$$=135.9>\frac{B_n}{8}ql^2=\frac{1}{8}\times20\times7.2^2=129.6(\text{kN}-\text{m})$$

满足要求

情况Ⅳ:已知条件同情况Ⅲ,但不考虑温度内力的影响,根据5.2.3条,对所求得的保护层厚度进行修正。

1.计算耐火时间为2.0小时梁的温度

初步选定保护层厚度 $d_i=27\text{mm}$

$$\rho_s VC_s=7850\times9376\times10^{-6}\times600=4.416\times10^4$$

$$2\rho_i C_i F_i d_i=2\times480\times10^3\times1584\times10^{-3}\times0.027$$

$$=4.106\times10^4<\rho_s VC_s$$

保护层为轻质保护层

$$B=\frac{\lambda_i}{d_i}\frac{F_i}{V}=\frac{0.105}{0.027}\cdot\frac{1584\times10^{-3}}{9376\times10^{-6}}=657.0$$

受火2.0小时梁的温度

$$T_s=(\sqrt{0.044+5\times10^{-5}\times657}-0.2)\times2\times3600+20$$

$=576(℃)$

2.该温度时钢的材性

$$\eta_T=0.324$$

3.内力组合

	组合系数	跨中弯矩 M(kNm)	轴力(kN)
恒载	1.0	$1.0\times12.4\times7.2^2/8=80.4$	0.0
活载	0.7	$0.7\times10.8\times7.2^2/8=49.0$	0.0
风载	0.3	0.0	0.0
组合内力		129.4	0.0

4.梁机构极限状态验算

$q=1.0\times12.4+0.7\times10.8=20.0\text{kN/m}$

$$n_T=\frac{N}{\gamma_R\eta_T fA}=0.0$$

$$\alpha_w=\frac{A_w}{A_f}=\frac{472\times8}{200\times14}=1.35\longrightarrow\frac{\alpha_w}{2+\alpha_w}=\frac{1.35}{2+1.35}=0.4>n_T$$

由式(7.3.2-2)

$$M_{pT}=\left[1-\frac{(2+\alpha_w)^2}{(4+\alpha_w)\alpha_w}n_T^2\right]W_p\gamma_R\eta_T f$$

$$=1.829\times10^6\times1.1\times0.324\times215$$

$$=140.1>\frac{B_n}{8}ql^2=\frac{1}{8}\times20\times7.2^2=129.6(\text{kN}-\text{m})$$

满足要求

取该梁的保护层厚度为 $d_i=(1+30\%)\times27=35\text{mm}$

二、第7章例题—钢柱抗火设计例题

(一)普通钢柱

已知条件

1.几何参数

$A=10000mm^2$

$I_x=89.65\times10^6mm^4$　　$i_x=94.7mm$

$W_x=6.9\times10^5mm^3$　　$W_{px}=7.69\times10^5mm^3$

2.常温材性

$E=2.06\times10^5MPa$　$f=215MPa$　$\rho_s=7850kg/m^3$

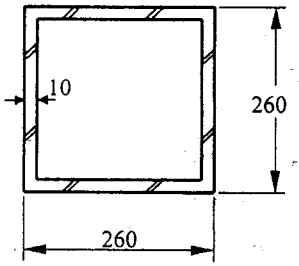
$C_s=600J/(kgK)$　$\lambda_s=45.0W/(mk)$

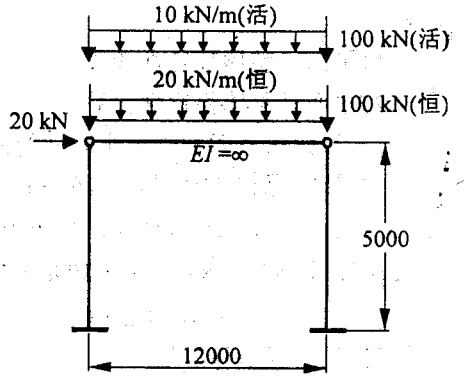
$\alpha_s=14\times10^{-6}m/(mK)$

3.涂料参数

$\rho_s=480kg/m^3$　$C_i=1000J/(kgK)$　$\lambda_i=0.105W/(mK)$

$V=10000\times10^{-6}m^3/m$　$F_i=1040\times10^{-3}m^2/m$(四面受火)





4.荷载及应力水平

恒载标准

均布:20kN/m;　　集中:100kN

活载标准值

均布：10kN/m；　　集中：100kN

风载　20kN

计算长度按　$2.0\times5000=10000(mm)$

$$\lambda_x=\frac{10000}{94.7}=105.6\longrightarrow\varphi_x=0.519$$

设计弯矩 $M=1.4\times50=70(kNm)$.

设计轴力 $N=1.2\times(100+20\times6)+1.4\times(100+10\times6)$

$=488(kN)$

$$\frac{N}{\varphi_xA}+\frac{M}{\gamma_sW_x(1-0.8N/N_{EXT})}\approx\frac{488\times10^3}{0.519\times10^4}+\frac{70\times10^6}{6.9\times10^5}$$

$$=195.5$$

近似应力水平为：$\frac{195.5}{215}=0.909$

抗火验算

除框架柱(柱两端具有反向曲率)以外的普通柱，需进行下列验算：

(1)平面内整体稳定性验算

(2)平面外整体稳定性验算

1.计算耐火时间为 2.5 小时柱的温度

初步选定保护层厚度 $d_i=25mm$

$\rho_sVC_s=7850\times10000\times10^{-6}\times600=4.71\times10^4$

$2\rho_iC_iF_id_i=2\times480\times10^3\times1040\times10^{-3}\times0.025$

$=2.5\times10^4<\rho_sVC_s$

保护层为轻质保护层

$$B=\frac{\lambda_i}{d_i}\cdot\frac{F_i}{V}=\frac{0.105}{0.025}\cdot\frac{1040\times10^{-3}}{10000\times10^{-6}}=436.8$$

受火 2.5 小时柱的温度

$T_s=(\sqrt{0.044+5\times10^{-5}\times436.8}-0.2)\times2.5\times3600+20$

$=529.3(℃)$

2.该温度时钢的材性

$\chi_T=0.518 \quad \eta_T=0.423$

$E_T=0.518\times2.06\times10^5=1.067\times10^5(MPa)$

3.内力组合

	组合系数	底部弯矩 M(kN－m)	轴力(kN)
恒载	1.0	0.0	$100+20\times6=220$
活载	0.7	0.0	$0.7\times(100+10\times6)=112$
风载	0.3	$0.3\times10\times5=15$	0.0
温度内力	1.0	0.0	0.0
组合内力		15	332

4.平面内整体稳定性验算

$$l_{0x}=2.0\times500=10000 \qquad \lambda_x=\frac{l_{0x}}{i_x}=\frac{10000}{94.7}=105.6$$

$\varphi_x=0.519$ 查表 7.2.2 $\alpha=1.09$ $\varphi_{xT}=\alpha\varphi_x=0.566$

$$N_{ExT}=\frac{\pi^2E_TA}{\lambda_x^2}=\frac{\pi^2\times1.067\times10^5\times10^4}{105.6^2}=9.44\times10^5(N)$$

$$\frac{N}{\varphi_{xT}A}+\frac{\beta_mM_x}{\gamma_xW_x(1-0.8N/N_{EXT})}$$

$$=\frac{332\times10^3}{0.566\times10^4}+\frac{1\times15\times10^6}{1.05\times6.9\times10^5\times(1-0.8\times532\times10^3/9.44\times10^5)}$$

$=87.5<\eta_T\gamma_Rf=0.423\times1.1\times215=100.0(MPa)$

满足要求

5.平面外整体稳定性验算

$l_{0y}=5000$　　$\lambda_y=\frac{l_{0y}}{i_y}=\frac{5000}{94.7}=52.8$

$\varphi_y=0.843$　查表 7.2.2　$\alpha=1.0$

$\varphi_{yT}=\alpha\varphi_y=1.0\times0.843=0.843$

对箱形截面　$\varphi'_{bT}=1.0$

$$\frac{N}{\varphi_{yT}A}+\frac{\beta_t M_x}{\varphi_{bT}W_x}=\frac{332\times10^3}{0.843\times10^4}+\frac{0.65\times15\times10^6}{1.0\times6.9\times10^5}$$

$=53.5<\eta_T\gamma_R f=0.423\times1.1\times215=100.0(\text{MPa})$

满足要求

取该柱保护层厚度为 $d_i=25\text{mm}$。

(二)框架柱

已知条件：

1.几何参数

$A=89600\text{mm}^2$

$I_x=4.707\times10^9\text{mm}^4$　　$i_x=229.2\text{mm}$

$W_x=1.569\times10^7\text{mm}^3$　$W_{px}=1.885\times10^7\text{mm}^3$

柱高：5000mm

2.常温材性

$E=2.06\times10^5\text{MPa}$　$f=215\text{MPa}$　$\rho_s=7850\text{kg/m}^3$

$C_s=600\text{J/(kgK)}$　$\lambda_s=45.0\text{W/(mK)}$

$\alpha_s=14\times10^{-6}\text{m/(mK)}$

3.涂料参数

$\rho_i=480\text{kg/m}^3$　　$C_i=1000\text{J/(kgK)}$　　$\lambda_i=0.105\text{W/(mK)}$

$V=89600\times10^{-6}\text{m}^3/\text{m}$　　$F_i=2400\times10^{-3}\text{m}^2/\text{m}$

4.荷载及应力水平

恒载产生轴力标准值：5520kN；弯矩标准值：268.4kN－m

活载产生轴力标准值：3810kN；弯矩标准值：174.6kN－m

风载产生轴力标准值：776kN；弯矩标准值：86.4kN－m

轴力设计值：$N = 1.2\times5520+1.4\times3810+0.3\times1.4\times776$

$=12283.92kN-m$

弯矩设计值：$M = 1.2\times268.4+1.4\times174.6+0.3\times1.4\times86.4$

$=602.8kN-m$

柱计算长度按 $0.693\times5000=3465mm$ 考虑，那么最大长细比

$$\lambda_x=\frac{l_0}{i_x}=\frac{3465}{229.2}=15.1\longrightarrow\varphi_y=0.983$$

$$\frac{N}{\varphi_x A}+\frac{M}{\gamma_s W_x(1-0.8N/N_{EXT})}\approx\frac{12283.92\times10^3}{0.983\times89600}+\frac{602.8\times10^6}{1.569\times10^7}$$

$$=177.92MPa$$

应力水平：$\frac{177.92}{215}=0.828$

5. 柱端综合约束刚度 K_T

考虑相邻柱升温影响后的柱端约束刚度

x 方向框架：$K_{Tx}=5.759\times10^4(N/mm)$

y 方向框架：$K_{Ty}=9.443\times10^4(N/mm)$

抗火验算

对框架柱(柱两端具有反向曲率的柱)，按 7.3.5 条规定进行验算。

1. 计算耐火时间为 3.0 小时柱的温度

初步选定保护层厚度 $d_i=30mm$

$\rho_s VC_s=7850\times89600\times10^{-6}\times600=4.22\times10^5$

$2\rho_i C_i F_i d_i=2\times480\times10^3\times2400\times10^{-3}\times0.03$

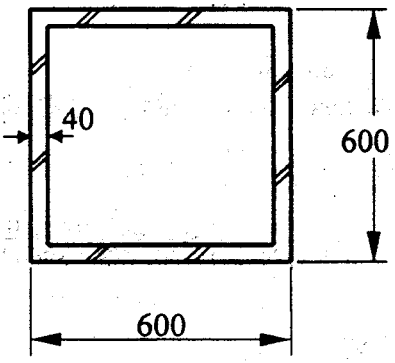
$=6.912\times10^4<\rho_s VC_s$

保护层为轻质保护层

$$B=\frac{\lambda_i}{d_i}\cdot\frac{F_i}{V}=\frac{0.105}{0.030}\cdot\frac{2400\times10^{-3}}{89600\times10^{-6}}=93.75$$

受火 3.0 小时柱的温度

$$T_s = (\sqrt{0.044 + 5\times10^{-5}\times93.75} - 0.2)\times3\times3600 + 20$$
$$= 243.0(℃)$$



2.该温度时钢的材性

$\chi_T = 0.944 \qquad \eta_T = 0.84$

$E_T = 0.944\times2.06\times10^5 = 1.944\times10^5(MPa)$

3.温度内力

$$N_{Tx} = \frac{5.579\times10^4}{\frac{2}{3}\cdot\frac{1.944\times10^5\times89600}{5000} + 5.579\times10^4}\cdot\frac{2}{3}\times1.944\times10^5$$
$$\times89600\times1.4\times10^{-5}(243-20)$$
$$= 8.772\times10^5(N)$$

同样地,可求得 $N_{Ty} = 1.416\times10^6(kN)$,

$N_T = N_{Tx} + N_{Ty} = 2293.2(kN)$

4.内力组合

柱	组合系数	N(kN)
恒　载	1.0	1.0×5520=5520
活　载	0.7	0.7×3810=2667
风　载	0.3	0.3×776=232.8
温度内力	1.0	1.0×2293.2=2293.2
组合内力		10713

5.框架柱稳定性验算

由前面求得，$\varphi_x=0.983$，查表 7.2.2 得，$\alpha=1.0$，$\varphi_{xT}=0.983$

由公式 7.3.5 得

$$\frac{N}{\varphi_T A}=\frac{10713\times10^3}{0.983\times89600}$$

$$=121.6<0.75\eta_T\gamma_R f=0.75\times0.84\times1.1\times215=149.0$$

满足要求

取该柱保护层厚度为 $d_i=30mm$。