

钢框架结构防火设计在 PKPM 中的实现

高磊

中国建筑科学研究院有限公司北京构力科技有限公司 北京 100013

[摘要] 在钢结构建筑工程设计中，由于钢结构的自身材料特性，钢结构防火设计是不可或缺的一个环节，有效的防火设计能增强建筑质量安全，对耐火性差的钢结构尤为关键。笔者结合设计软件交流一下防火设计的操作，希望能给专业设计人员提供借鉴。

[关键词] 防火设计；荷载比；临界温度法；等效热传导系数；等效热阻；

0 引言

由于钢结构设计经验的不断成熟，钢材成本的不断降低，已经成为建筑结构中重要的材料之一，钢材本身属于不可燃材料，但是其耐火性比较差，在高温下，会逐渐变形，材料强度和稳定性迅速下降，造成结构坍塌，所以需要钢结构建筑进行防火设计，以延迟在突发火灾下钢结构房屋失去稳定而倒塌的时间。

随着《建筑钢结构防火技术规范》GB51249-2017 的发布，钢结构防火设计越来越受到设计重视。下文将结合 SATWE 程序，针对钢结构防火设计的概念与操作流程进行介绍。

1 防火材料

目前程序可以计算防火材料为膨胀型和非膨胀型，市面上称膨胀型为薄型防火材料，非膨胀型为厚型防火材料。

膨胀型防火涂料的厚度一般在 1mm-7mm 之间（厚度小于 3mm 时，也称超薄型防火涂料）。该类防火涂料由合适的水性聚合物为基料，再配以阻燃剂复合体系、耐火纤维、防火添加剂混合而成。遇火后自身发泡膨胀，形成比原涂料厚度十倍左右的多孔碳质层。多孔碳质层可阻挡外部热源对基材的传热。耐火极限可达 0.5 小时-2 小时。

非膨胀型即厚型防火涂料厚度一般在 7mm-50mm 范围。该类防火涂料基料大都是无机物，成本低廉，自身就具备良好的隔热性，耐火极限可达 0.5 小时~3 小时以上。

2 规范方法以及程序实现

根据《建筑钢结构防火技术规范》GB51249-2017，对防火设计提出了三种方法：耐火极限法、承载力法和临界温度法。

目前程序支持的设计方法为临界温度法，根据《建筑钢结构防火技术规范》的要求，建立力学模型，进行火灾中承载力极限状态的抗火设计。

设计流程为：

先计算钢构件在无防火涂料情况下，在火灾持续时间的内部温度 T_s ，计算依据见《建筑钢结构防火技术规范》6.2.1 公式：

$$\Delta T_s = \alpha \cdot \frac{1}{\rho_s c_s} \cdot \frac{F}{V} \cdot (T_g - T_s) \Delta t \quad (1)$$

其中：

----- α 是综合热传递系数

----- $\rho_s c_s$ 分别为钢材密度和比热

----- $\frac{F}{V}$ 为无防火保护钢构件的截面形状系数 (m^{-1})

T_s 和 T_g 分别为 t 时刻钢构件的内部温度和热烟气的平均温度 ($^{\circ}C$)

1. 通过高温下的材料性能参数及构件外荷载的作用，进行荷载组合并区分受载构件的类型，分别计算钢梁、钢柱、支撑的荷载比。根据钢构件的受力类型按照轴心受拉、轴心受压、偏心受拉、偏心受压分别计算构件截面的强度荷载比 R 和稳定荷载比 R' ，荷载比的计算详见《建筑钢结构防火技术规范》7.2.1、7.2.2、7.2.3、7.2.4、7.2.5 条具体要求，文中不再具体罗列。

以受弯构件为例示意说明：

$$\text{强度荷载比： } R = \frac{M}{\gamma W_n f}$$

$$\text{稳定荷载比： } R' = \frac{M}{\phi_b W f}$$

其中：

----- M 为火灾下钢构件最不利截面处的弯矩设计值

----- W_n 为钢构件最不利截面的净截面模量

----- γ 为截面塑性发展系数

----- ϕ_b 为常温下受弯钢构件的稳定系数

----- W 为钢构件的毛截面模量

2. 通过《建筑钢结构防火技术规范》7.2 条要求得到临界温度 T_d 。

同样以受弯构件的临界温度表格为例：

表 7.2.1 按截面强度荷载比 R 确定的钢构件的临界温度 T_d ($^{\circ}\text{C}$)

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
结构钢 构件	663	641	621	601	581	562	542	523	502	481	459	435	407
耐火钢 构件	718	706	694	679	661	641	618	590	557	517	466	401	313

表 7.2.3 根据构件稳定荷载比 R' 确定的受弯钢构件的临界温度 T_d ($^{\circ}\text{C}$)

构件材料		结构钢构件						耐火钢构件					
φ_b		≤ 0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	≤ 0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
R'	0.30	657	657	661	662	663	664	764	750	740	732	726	718
	0.35	640	640	641	642	642	642	748	734	724	717	712	706
	0.40	626	625	624	623	623	621	733	720	712	706	701	694
	0.45	612	610	608	606	604	601	721	709	701	694	688	679
	0.50	599	594	591	588	585	582	709	698	688	680	672	661
	0.55	581	576	572	569	566	562	699	685	673	663	653	641
	0.60	563	557	553	549	547	543	688	670	655	642	631	618
	0.65	542	536	532	528	526	523	673	650	631	615	603	590
	0.70	515	511	508	506	505	503	655	621	594	580	569	557
	0.75	482	482	483	483	482	482	625	572	547	535	526	517
	0.80	439	439	452	456	458	459	525	496	483	476	471	466
	0.85	384	384	417	426	431	434	393	393	397	399	400	400
0.90	302	302	371	389	399	405	267	267	290	299	306	311	

图 1 临界温度的确定

钢框架结构钢构件是否为耐火钢需要在程序的参数定义中根据实际情况去指定，如下图所示：



图2 耐火钢的指定

需要注意的是，通过查表我们可以看到荷载比的上限为0.9，也就是说，如果验算得到的构件荷载比超出表格的上限，则程序不能确定构件的临界温度以及确定防火涂料的保护层厚度，如下图所示：

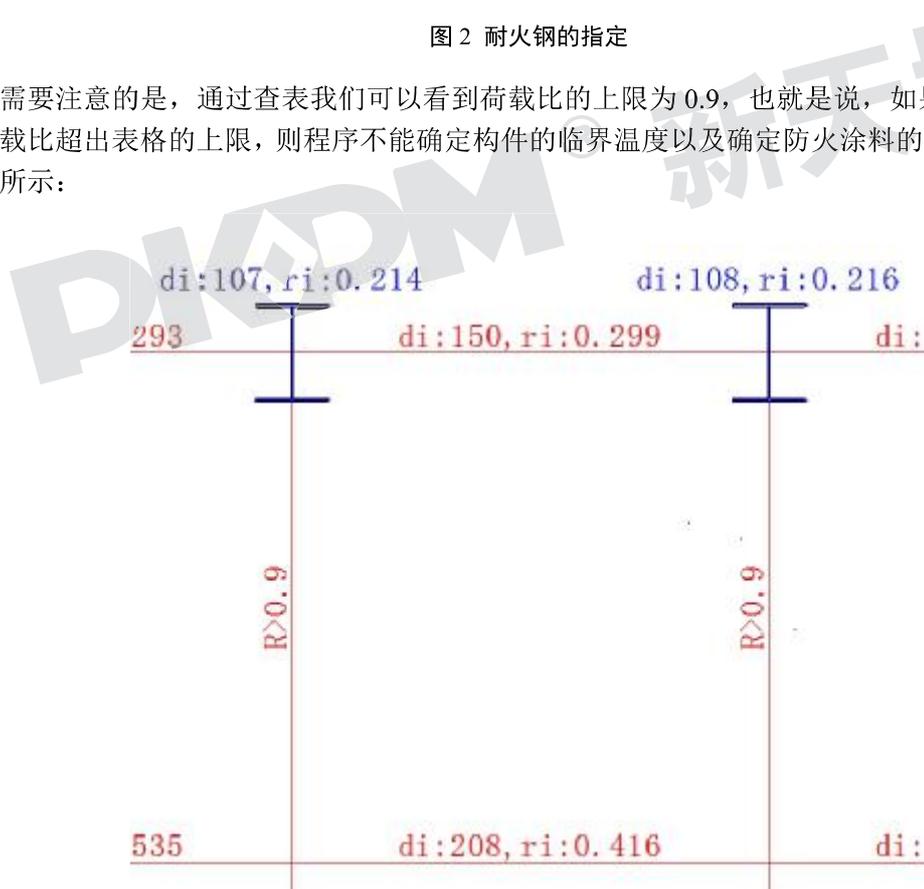


图3 非膨胀型防火保护层结果输出

得到临界温度 T_d 之后，程序会先判断无防火涂料厚度下的钢构件的内部温度 T_s 是否小于临界温度 T_d ，如果小于临界温度 T_d ，则钢构件不需要设置防火涂料。如果 $T_s > T_d$ ，按照考虑防火涂料的情况重新计算钢构件的内部温度 T_s 。

假定有防火材料，计算钢构件在火灾持续时间条件下的内部温度 T_s ，认定 T_s 为火灾持续时间下的最高温度，计算依据《建筑钢结构防火技术规范》6.2.3 公式计算得到，

$$T_s = \left(\sqrt{0.044 + 5.0 \times 10^{-3} \alpha \frac{F_i}{V} - 0.2} \right) t + T_{s0}$$

$$T_s \leq 700^\circ\text{C}$$

其中：

----- $\frac{F_i}{V}$ 为有防火保护的钢构件的截面形状系数

----- t 是按照防火等级对应的耐火极限时间

----- α 是综合热传递系数， $\alpha = \frac{\lambda_i}{d_i}$

根据荷载规范 3.2.6，撞击、爆炸、火灾事故的发生，均采用偶然组合进行设计，程序工况组合均采用偶然组合，如下图所示：

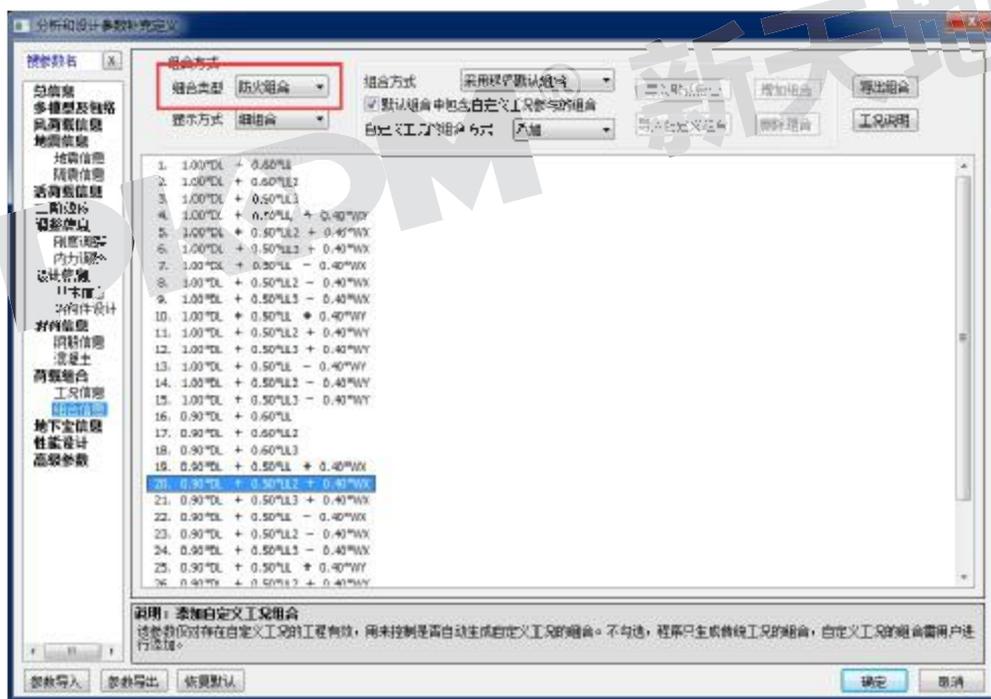


图 4 防火组合

计算涂料厚度时候，可用临界温度 T_d 替换钢构件的内部温度 T_s ，火灾持续时间 t 用耐火极限代则可得到综合热传递系数 α ， $\alpha = \frac{\lambda_i}{d_i}$ ，由综合热传递系数可以得到需要的非膨胀型防火材料厚度 d_i 。

查看构件信息可以看到防火验算时候的荷载比，防火涂料的涂料厚度以及防火涂料的等效热

阻，如下图所示：

钢柱结果：

```

强度荷载比：      (7)  Mx=329.29 My=10.98 N=-1253.34 R1=0.36
平面内稳定荷载比： (7)  Mx=329.29 My=10.98 N=-1253.34 R2=0.30
平面外稳定荷载比： (7)  Mx=329.29 My=10.98 N=-1253.34 R3=0.26
防火保护层：      (7)  Ts=1080.98 Td=637.16 Ri=0.21 di=0.1072
  
```

图 5 钢柱非膨胀型防火保护层结果构件信息输出

钢梁结果：

强度荷载比	(8) N=0.00, M=-65.24, R1=0.33
平面内稳定荷载比	(8) N=0.00, M=-65.24, R2=0.00
防火保护层	(8) Ts=1004.66, Td=648.57, Ri=0.30, di=0.1495

图 6 钢梁非膨胀型防火保护层结果构件信息输出

需要注意的是，构件信息输出的 T_s 为未考虑防火涂料的钢构件在耐火极限下的最高温度， T_d 为临界温度， R_i 为等效热阻， d_i 为非膨胀型防火涂料的保护层厚度，单位是米

目前程序只考虑了非膨胀型防火涂料厚度的计算。

《建筑钢结构防火技术规范》5.3.2：“膨胀型防火涂料保护层的等效热阻，可根据标准耐火实验得到的钢构件实测升温曲线按下式计算：

$$R_i = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{\left(\frac{T_s - T_{s0}}{t_0} + 0.2\right)^2 - 0.044} * \frac{F_i}{V} \quad ,$$

《建筑钢结构防火技术规范》5.3.3：“膨胀型防火涂料应给出最大使用厚度、最小使用厚度的等效热阻以及防火涂料使用厚度按最大使用厚度与最小使用厚度之差的 1/4 递增的等效热阻，其他厚度下的等效热阻可采用线性插值方法确定”

《建筑钢结构防火技术规范》5.3.2 和 5.3.3 条文说明：“针对膨胀型防火材料的特点，第 5.3.3 条规定膨胀型防火涂料应给出 5 个使用厚度的等效热阻”

《钢结构设计手册》18.1.3 章节钢结构防火保护措施中，也明确提到：“膨胀型防火涂料的保护层厚度必须以实际构件的耐火试验确定”

膨胀型防火涂料的涂料保护层厚度的计算需要基于实测的升温曲线去计算，各个厂家的实测曲线并不相同，所以程序目前无法计算膨胀型防火涂料的厚度。

3 总结

钢材虽然不会自身燃烧，但是钢材耐火性很差，随着温度升高，钢结构构件强度会逐渐下降，

当温度达到 350℃，其强度大约会降低 1/3；温度达到 600℃，强度大约降低 2/3。这是因为钢材内部在温度升高时会出现质变，导致原有的材料屈服强度，弹性模量等物理特性下降。当火灾发生时，钢结构建筑必然会发生变形，一般情况下 15 分钟后将会出现坍塌，所以钢结构防火涂料的喷涂就显得尤为重要，需要在设计阶段加强对钢结构构件的防火措施的考虑。

参 考 文 献

- [1] GB51249-2017 建筑钢结构防火技术规范[S]. 北京，中国建筑工业出版社，2018.
- [2] GB50017-2017 钢结构设计标准[S]. 北京，中国建筑工业出版社，2018.

PKPM® 新天地