

YJK 钢结构防火设计验算疑难问题

余泽云

钢结构防火防腐性能比较差，钢结构材料虽为非燃烧材料，但却易导热、怕火烧，其耐火极限一般仅为 15~20 分钟。在火灾的温度下，未加防火保护的钢结构，当结构温度达到 350℃、500℃、600℃时，其强度分别约下降 1/3、1/2、2/3，当结构温度达到 600℃以上时，将完全丧失承载能力。随着温度的升高，钢材的强度和弹性模量会下降，延伸率和线膨胀系数增大。因此 2018 年 4 月 1 月开始执行的《建筑钢结构防火技术规范》GB51249-2017 也要求对钢结构进行防火设计验算，

《建筑钢结构防火技术规范》GB51249-2017 中 3.2.6 条给出防火设计验算的三种方法：耐火极限法、承载力法和临界温度法，实际工程只须采用其中一种方法进行验算即可。

YJK 软件提供了承载力法防火设计验算，软件操作易上手，但很多用户在结合实际工程项目进行防火验算时，会遇到一些疑难问题无法着手，比如保护层厚度、等效热传导系数或等效热阻如何确定等问题，现结合 YJK 软件就钢结构防火设计验算的一些疑难问题进行汇总，希望对大家有所帮助。

1、《建筑钢结构防火技术规范》6.2.2 条给出了迭代计算钢构件温度的公式，另外 6.2.3 条也给出计算构件温度的近似公式，软件具体是怎么执行的？

答：软件先按照 6.1.1 条公式计算出室内热烟气平均温度，然后再按照 6.2.2 条公式通过迭代升温的方式计算出钢构件在设计耐火极限时的最高温度，在前处理截面形状系数菜单下以及构件信息中均可查询此温度值，具体迭代计算过程可参看 2023 年 08 月 17 日技术周刊《钢构件防火迭代升温计算及 YJK 的结果校核》。而 6.2.3 条的近似计算公式是通过对本规范第 6.2.2 条的迭代升温计算公式（6.2.2-1）、式（6.2.2-4）的计算结果进行数学拟合得到的，当钢构件的温度不大于 700℃时，二者的计算结果偏差很小；由于式（6.2.3）为显式计算公式，极大地方便了手算校核。

6.1.1 常见建筑的室内火灾升温曲线可按下列规定确定：

1 对于以纤维类物质为主的火灾，可按下式确定：

$$T_g - T_{g0} = 345 \lg(8t + 1) \quad (6.1.1-1)$$

2 对于以烃类物质为主的火灾，可按下式确定：

$$T_g - T_{g0} = 1080 \times (1 - 0.325e^{-t/6} - 0.675e^{-2.5t}) \quad (6.1.1-2)$$

式中： t ——火灾持续时间(min)；

T_g ——火灾发展到 t 时刻的热烟气平均温度(°C)；

T_{g0} ——火灾前室内环境的温度(°C)，可取 20°C。

6.2.2 火灾下有防火保护钢构件的温度可按下式计算。

$$\Delta T_s = \alpha \cdot \frac{1}{\rho_s c_s} \cdot \frac{F_i}{V} \cdot (T_g - T_s) \Delta t \quad (6.2.2-1)$$

6.2.3 在标准火灾下，采用轻质防火保护层的钢构件的温度可按下式近似计算；在非标准火灾下，计算采用轻质防火保护层的钢构件的温度时，火灾时间 t 应采用按本规范第 6.1.3 条确定的等效曝火时间 t_e 。

$$T_s = \left(\sqrt{0.044 + 5.0 \times 10^{-5} \alpha \frac{F_i}{V}} - 0.2 \right) t + T_{s0} \quad T_s \leq 700^\circ\text{C} \quad (6.2.3)$$

式中： t ——火灾持续时间(s)。



2、进行防火验算须输入等效热传导系数或等效热阻，但设计前难以获得相应厂家防

火涂料的相关性能参数，实际中可有办法解决？

答：《建筑钢结构防火技术规范》5.3节给出了根据标准耐火试验得到的钢构件实测升温曲线计算等效热传导系数或等效热阻的公式，实际工程操作中可先根据以往工程相同防火涂料的型式检验报告计算出相应梁和柱等构件的等效热传导系数或等效热阻，计算时需要用到构件的截面形状系数，可对截面形状系数分组进行计算，再布置到模型中进行验算。当然最终要以该项目的型式检验报告为准，要求该项目的型式检验报告试件温度达到相同温度所需时间不小于设计计算等效热传导系数或等效热阻所用的时间，否则应重新进行复核。

例如某室外钢结构项目钢梁的截面形状系数分别有138.8、142.6、157.8、173.3、178.3、200.3 (m^{-1})，选择室外非膨胀型防火涂料，参考以往工程室外非膨胀型钢结构防火涂料的型式检验报告：基材为36b热轧工字钢，截面形状系数为 $126m^{-1}$ ，涂层厚度为24mm，耐火试验进行到90min时，最高平均温度为 $518^{\circ}C$ ，各截面形状系数对应的等效热传导系数计算如下表所示：

计算参数	$d_i=0.024m, T_s=540^{\circ}C, T_{s0}=20^{\circ}C, t_0=90 \times 60=5400s$					
截面形状系数 (m^{-1})	138.8	142.6	157.8	173.3	178.3	200.3
等效热传导系数 [W/(m· $^{\circ}C$)]	0.151	0.147	0.133	0.121	0.118	0.105

采用软件进行验算可先以最不利的等效热传导系数0.151输入到所有的钢梁中进行初步试算，满足要求可停止计算，如不能满足要求可分组输入，以每个分组中最不利值（最大值）的等效热传导系数输入到该分组对应的钢梁构件上进行验算，直到满足要求为止。其他构件的验算方法类似。

如果选择的是膨胀型防火涂料，应该以每个分组中的最不利值（最小值）的等效热阻输入模型中验算，直到满足要求为止。

5.3.1 非膨胀型防火涂料的等效热传导系数，可根据标准耐火试验得到的钢试件实测升温曲线和试件的保护层厚度按下式计算：

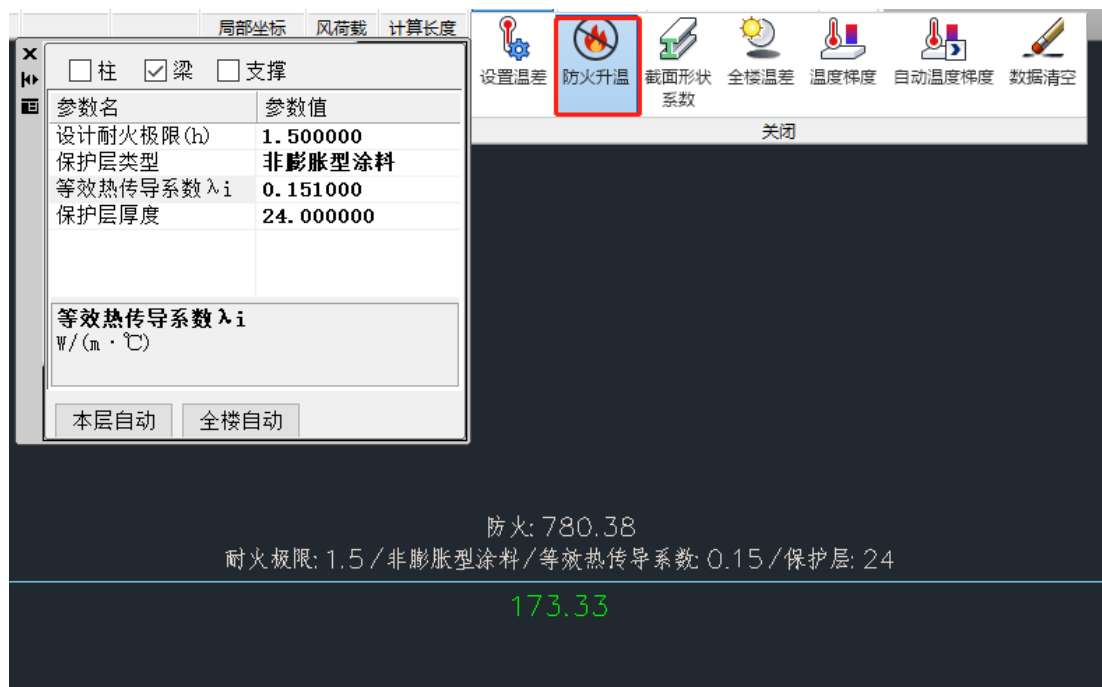
$$\lambda_i = \frac{d_i}{\frac{5 \times 10^{-5}}{\left(\frac{T_s - T_{s0}}{t_0} + 0.2\right)^2 - 0.044} \cdot \frac{F_i}{V}} \quad (5.3.1)$$

式中： λ_i ——等效热传导系数[W/(m· $^{\circ}C$)]；

5.3.2 膨胀型防火涂料保护层的等效热阻,可根据标准耐火试验得到的钢构件实测升温曲线按下式计算:

$$R_i = \frac{5 \times 10^{-5}}{\left(\frac{T_s - T_{s0}}{t_0} + 0.2\right)^2 - 0.044} \cdot \frac{F_i}{V} \quad (5.3.2)$$

式中: R_i ——防火保护层的等效热阻(对应于该防火保护层厚度) ($\text{m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$)。



3、在防火升温过程中,构件的弹性模量和材料强度都有折减,软件在计算各工况内力时如何执行的?

答:软件执行《建筑钢结构防火技术规范》3.2.5条的相关要求:火灾下构件的边界约束和在外荷载作用下产生的内力采用常温下的边界约束和内力,计算构件在火灾下的组合效应。计算火灾下构件的承载力时,构件温度应取其截面的最高平均温度,并应采用结构材料在相应温度下的强度与弹性模量,程序自动执行《建筑钢结构防火技术规范》中5.1.2条及5.1.3条的相关公式。

5.1.2 高温下结构钢的强度设计值应按下列公式计算。

$$f_T = \eta_{sT} f \quad (5.1.2-1)$$

$$\eta_{sT} = \begin{cases} 1.0 & 20^\circ\text{C} \leq T_s \leq 300^\circ\text{C} \\ 1.24 \times 10^{-8} T_s^3 - 2.096 \times 10^{-5} T_s^2 \\ + 9.228 \times 10^{-3} T_s - 0.2168 & 300^\circ\text{C} < T_s < 800^\circ\text{C} \\ 0.5 - T_s/2000 & 800^\circ\text{C} \leq T_s \leq 1000^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5.1.2-2)$$

式中： T_s —— 钢材的温度($^\circ\text{C}$)；

f_T —— 高温下钢材的强度设计值(N/mm^2)；

f —— 常温下钢材的强度设计值(N/mm^2)，应按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的规定取值；

η_{sT} —— 高温下钢材的屈服强度折减系数。

5.1.3 高温下结构钢的弹性模量应按下列公式计算。

$$E_{sT} = \chi_{sT} E_s \quad (5.1.3-1)$$

$$\chi_{sT} = \begin{cases} \frac{7T_s - 4780}{6T_s - 4760} & 20^\circ\text{C} \leq T_s < 600^\circ\text{C} \\ \frac{1000 - T_s}{6T_s - 2800} & 600^\circ\text{C} \leq T_s \leq 1000^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5.1.3-2)$$

式中： E_{sT} —— 高温下钢材的弹性模量(N/mm^2)；

E_s —— 常温下钢材的弹性模量(N/mm^2)，应按照国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的规定取值；

χ_{sT} —— 高温下钢材的弹性模量折减系数。

4、YJK 软件是否可以对组合结构进行防火验算，另外《建筑钢结构防火设计规范》

8.1.1 条给出了组合结构防火验算公式的适用范围，软件是否会自动判断？

答：软件可以对组合钢结构进行防火验算，支持的构件类型包括圆钢管砼柱、矩形钢管砼柱以及钢与混凝土组合梁。圆钢管砼柱和矩形钢管砼柱按照《建筑钢结构防火设计规范》GB51249-2017 第 8 章进行防火保护层验算，验算圆钢管砼柱和矩形钢管砼柱是否需要保护层及保护层厚度是否满足要求。依据《建筑钢结构防火设计规范》GB51249-2017，圆钢管砼柱和矩形钢管砼柱仅支持金属网抹 M5 水泥砂浆和非膨

胀型钢结构防火涂料保护层的定义。软件对钢与混凝土组合梁进行防火验算时，规则与钢梁类似，也是承载力法。组合梁支持膨胀型和非膨胀型钢结构防火涂料的定义。

目前程序未对 8.1.1 中内容进行判断，程序是否对圆钢管砼柱和矩形钢管砼柱防火保护层进行验算，仅与前处理温度荷载防火升温菜单中是否定义了防火保护层信息有关，因此需要设计师自行判断是否满足要求。

圆钢管砼柱防火保护层厚度按照下图中公式进行验算，防火保护层的类型包含金属网抹 M5 水泥砂浆和非膨胀型钢结构防火涂料：

8.1.8 标准火灾下受火时间小于或等于 3.0h 的圆钢管混凝土柱，其防火保护层的设计厚度可按下列公式计算，也可按本规范附录 C 查表确定；对于非标准火灾，公式中的受火时间 t 应取等效曝火时间。

1 当防火保护层采用金属网抹 M5 水泥砂浆时，防火保护层的设计厚度应按下列公式计算：

$$d_i = k_{LR} (135 - 1.12\lambda) (1.85t - 0.5t^2 + 0.07t^3) C^{0.0045\lambda - 0.396} \quad (8.1.8-1)$$

$$k_{LR} = \begin{cases} \frac{R - k_T}{0.77 - k_T} & R < 0.77 \\ \frac{1}{3.618 - 0.15t - (3.4 - 0.2t)R} & R \geq 0.77 \text{ 且 } k_T < 0.77 \\ (2.5t + 2.3) \frac{R - k_T}{1 - k_T} & k_T \geq 0.77 \end{cases} \quad (8.1.8-2)$$

2 当防火保护层采用非膨胀型钢结构防火涂料时，防火保护层的设计厚度应按下列公式计算：

$$d_i = k_{LR} (19.2t + 9.6) C^{0.0019\lambda - 0.28} \quad (8.1.8-3)$$

$$k_{LR} = \begin{cases} \frac{R - k_T}{0.77 - k_T} & R < 0.77 \\ \frac{1}{3.695 - 3.5R} & R \geq 0.77 \text{ 且 } k_T < 0.77 \\ 7.2t \frac{R - k_T}{1 - k_T} & k_T \geq 0.77 \end{cases} \quad (8.1.8-4)$$

式中： d_i —— 防火保护层厚度(mm)；

k_T —— 钢管混凝土柱火灾下的承载力系数；

R —— 荷载比；

t —— 受火时间(h)；

C —— 钢管混凝土柱截面周长(mm)；

λ —— 长细比；

k_{LR} —— 计算参数,当计算值大于 1.0 时,取 $k_{LR} = 1.0$;当计算值小于 0 时,取 $k_{LR} = 0$ 。

矩形钢管砼柱防火保护层厚度按照下图中公式进行验算,防火保护层的类型包含金属网抹 M5 水泥砂浆和非膨胀型钢结构防火涂料:

8.1.9 标准火灾下受火时间小于或等于 3.0h 的矩形钢管混凝土柱,其防火保护层的设计厚度可按下列公式计算,也可按本规范附录 C 查表确定;对于非标准火灾,公式中的受火时间 t 应取等效曝火时间。

1 当防火保护层采用金属网抹 M5 水泥砂浆时,防火保护层的设计厚度可按下列公式计算:

$$d_i = k_{LR} (220.8t + 123.8) C^{3.25 \times 10^{-4} \lambda - 0.3075} \quad (8.1.9-1)$$

$$k_{LR} = \begin{cases} \frac{R - k_T}{0.77 - k_T} & R < 0.77 \\ \frac{1}{3.464 - 0.15t - (3.2 - 0.2t)R} & R \geq 0.77 \text{ 且 } k_T < 0.77 \\ 5.7t \frac{R - k_T}{1 - k_T} & k_T \geq 0.77 \end{cases}$$

(8.1.9-2)

2 当防火保护层采用非膨胀型钢结构防火涂料时,防火保护

层的设计厚度可按下列公式计算:

$$d_i = k_{LR} (149.6t + 22) C^{2 \times 10^{-5} \lambda^2 - 0.0017\lambda - 0.42} \quad (8.1.9-3)$$
$$k_{LR} = \begin{cases} \frac{R - k_T}{0.77 - k_T} & R < 0.77 \\ \frac{1}{3.695 - 3.5R} & R \geq 0.77 \text{ 且 } k_T < 0.77 \\ 10t \frac{R - k_T}{1 - k_T} & k_T \geq 0.77 \end{cases} \quad (8.1.9-4)$$

式中符号含义与本规范式(8.1.8)相同。

8.1.1 符合下列条件的实心矩形和圆形钢管混凝土柱,可按本规范第 8.1.2 条~第 8.1.9 条进行耐火验算与防火保护设计。

1 钢管采用 Q235、Q345、Q390 和 Q420 钢,混凝土强度等级为 C30~C80,且含钢率 A_s/A_c 为 0.04~0.20;

2 柱长细比 λ 为 10~60;

3 圆钢管混凝土柱的截面外直径为 200mm~1400mm,荷载偏心率 e/r 为 0~3.0(e 为荷载偏心距, r 为钢管截面外半径);矩形钢管混凝土柱的截面短边长度为 200mm~1400mm,荷载偏心率 e/r 为 0~3.0(e 为荷载偏心距, r 为荷载偏心方向边长的一半)。

5、当防火涂料设计厚度和型式检验报告载明的厚度不一致时,如何解决此问题?

答:根据《钢结构防火涂料应用技术规程》3.1.6 条的要求,建筑物或构筑物钢结构设计的耐火极限确定后,当设计厚度和型式检验报告载明的厚度不一致时,应将型式检验报告载明的厚度作为能够满足钢结构防火需求的防火涂层厚度。

6、进行钢结构防火验算后,设计文件中应注明哪些防火设计内容?

答:《建筑钢结构防火技术规范》3.1.4 条:钢结构的防火设计文件应注明建筑的耐火等级、构件的设计耐火极限、构件的防火保护措施(详《建筑钢结构防火技术规范》4.1.2 条)、防火材料的性能要求(详《钢结构防火涂料》)及设计指标(涂层厚度、等效热传导系数或等效热阻)。

7、当施工所用防火保护材料的等效热传导系数与设计文件要求不一致时，应如何解决此问题？

答：根据《建筑钢结构防火技术规范》3.1.5 条要求，当施工所用防火保护材料的等效热传导系数与设计文件要求不一致时，应根据防火保护层的等效热阻相等的原则确定防火保护层的施用厚度，并应经设计单位认可。对于非膨胀型钢结构防火涂料（防火板）可按本规范附录 A 确定防火保护层的施用厚度；对于膨胀型防火涂料，可根据涂层的等效热阻直接确定其施用厚度。

附录 A 防火保护层的施用厚度

当工程实际使用的非膨胀型防火涂料(防火板)的等效热传导系数与设计要求不一致时,可按下式确定防火保护层的施用厚度:

$$d_{i2} = d_{i1} \frac{\lambda_{i2}}{\lambda_{i1}} \quad (\text{A-1})$$

式中： d_{i1} —— 钢结构防火设计技术文件规定的防火保护层的厚度(mm)；

d_{i2} —— 防火保护层实际施用厚度(mm)；

λ_{i1} —— 钢结构防火设计技术文件规定的非膨胀型防火涂料、防火板的等效热传导系数[W/(m·℃)]；

λ_{i2} —— 施工采用的非膨胀型防火涂料、防火板的等效热传导系数[W/(m·℃)]。