# JG-STRAT 钢结构防火设计

#### ---依据《建筑钢结构防火技术规范 GB51249-2017》

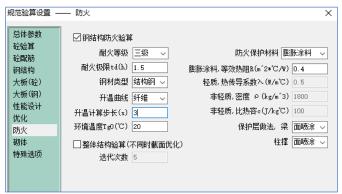
JG-STRAT 规范验算模块 Archi, 包含《建筑钢结构防火技术规范 GB51249-2017》(下文简称规范)规定的钢梁柱、钢管混凝土柱撑(圆/方)、钢和混凝土组合梁的防火验算。

Archi 防火验算采用精度更高的"承载力法",对钢梁、钢柱撑、组合梁,多次迭代验算,准确确定外露钢构件必要的防护层厚度。

Archi 防火验算是独立进程,与中大震性能设计、多塔分塔包络等验算过程,同时进行、相互不干扰。

JG-STRAT 实现防火 "整体结构验算"。Archi 将根据无防护、有防护下钢构件的火灾温度,计算高温下刚度折减,然后自动调用 Strat 计算刚度改变后工况内力(内力重分布),再次进入Archi 用"承载力法"迭代确定防护层。多次 Strat、Archi 循环迭代,直到结果趋于稳定。JG-防火 "整体结构验算"是双重迭代的过程。

# 1、Archi 规范验算中"防火"验算参数



Archi 防火验算参数

- ◆ **钢结构防火验算**,选中该选项进行防火验算。
- ♦ 耐火等级

当耐火等级为一级时,防火荷载组合乘以重要性系数 $\gamma_{0T}$ =1.1。二级、三级 $\gamma_{0T}$ =1.0.

#### ♦ 耐火极限 ta

即钢结构耐火时间,根据设计要求输入。按标准升温曲线,t<sub>d</sub> 值越大,火灾温度越高,需要的防护厚度越大。

#### ◆ 钢材类型

选择普通结构钢、耐火钢。耐火钢在高温下强度更高。

#### ◆ 升温曲线

分纤维、烃类两种,对应规范不同的升温曲线,如下图。

纤维火灾的可燃物为木材、纸张、棉花、布匹、衣物、少量塑料或合成材料。

**烃类**火灾的可燃物为烃类材料,如石油化工建筑和仓储。

1 对于以纤维类物质为主的火灾,可按下式确定:

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

2 对于以烃类物质为主的火灾,可按下式确定:

$$T_{\rm g}-T_{\rm g0}=1080 imes (1-0.325 e^{-{\rm t/6}}-0.675 e^{-2.5{\rm t}})$$

(6.1.1-2)

式中: t — 火灾持续时间(min);

 $T_{\rm g}$  ——火灾发展到 t 时刻的热烟气平均温度(℃);

 $T_{s0}$  ——火灾前室内环境的温度( $^{\circ}$ ),可取 20 $^{\circ}$ 0.

#### ◆ 升温计算步长

为计算钢构件火灾温度时的时间步长,一般 3s~5s。

火灾下烟气温度 Tg(即升温曲线)是时间 t 的显式表达式,但钢构件无防护、有防护下的温度 Ts 是时间 t 的增量表达式,需要分步累积计算。

时间步长宜取小值,以提高计算精度,并且是函数式的累积计算过程,速度很快。

$$\Delta T_{\rm s} = \alpha \cdot \frac{1}{\rho_{\rm s} c_{\rm s}} \cdot \frac{F}{V} \cdot (T_{\rm g} - T_{\rm s}) \Delta t \qquad (6.2.1-1)$$

6.2.2 火灾下有防火保护钢构件的温度可按下式计算。

$$\Delta T_{\rm s} = \alpha \cdot \frac{1}{\rho_{\rm s} C_{\rm s}} \cdot \frac{F_{\rm i}}{V} \cdot (T_{\rm g} - T_{\rm s}) \Delta t \qquad (6.2.2-1)$$

#### ◆ 环境温度 Tg0

即火灾发生之间的结构温度。按防火规范,一般取 20℃.

#### ♦ 整体结构验算

火灾高温下,钢、砼等材料的强度降低的同时刚度也会降低,导致恒活、风作用下的内力重分布。并且在防火验算过程中,随着防护厚度的增减,构件火灾温度、刚度动态变化,相应内力分布的也会动态变化。

规范对火灾下的内力效应,有两种方法:

1)基于构件耐火验算。对于弯曲受力为主的梁不考虑热膨胀效应,且忽略边界约束条件的变化,即不需考虑火灾升温内力和内力重分布。对于轴向受力为主的柱需考虑热膨胀效应,但柱的轴向膨胀变形基本不产生内力。因此该验算方式可直接采用常规(即常温下)计算内力。

2) 基于整体结构耐火验算。考虑结构的热膨胀效应(即火灾升温产生的温度内力),和材料性能高温改变(即内力重分布),适用于预应力钢结构、跨度 60m 以上的大跨度钢结构。

#### 5.1.3 高温下结构钢的弹性模量应按下列公式计算。

$$E_{sT} = \chi_{sT} E_s \qquad (5. 1. 3-1)$$

$$\begin{cases} \frac{7T_s - 4780}{6T_s - 4760} & 20 \text{ °C} \leqslant T_s < 600 \text{ °C} \\ \frac{1000 - T_s}{6T_s - 2800} & 600 \text{ °C} \leqslant T_s \leqslant 1000 \text{ °C} \end{cases} \qquad (5. 1. 3-2)$$

式中:  $E_{sT}$  ——高温下钢材的弹性模量(N/mm<sup>2</sup>);

E。——常温下钢材的弹性模量(N/mm²),应按照现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的规定取值;

χ<sub>sT</sub> ——高温下钢材的弹性模量折减系数。

当不选"整体结构验算"时,Archi 构件防火验算采用常规计算(即常温受力)的内力。对钢构件、钢和混凝土组合梁,采用规范"承载力法",确定防火层厚度也是一个迭代过程(详见下文)。

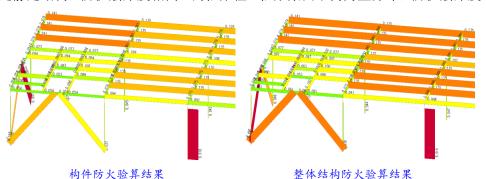
当选中"整体结构验算"时,Archi 将内部调用 Strat,按如下步骤迭代计算。

- a) Archi 首先采用常温下内力确定防火层厚度、 $t_d$  时刻刚构件温度,得到折减后的钢材弹性模量  $E_{s\tau}$ 。
  - b) Archi 内部调用 Strat,按降低后刚度 Est 按计算,得到火灾下重分布后的工况内力。

- c) Archi 根据更新后构件内力,重新计算防火层厚度。
- d) 如前后两次结果差别较大,则重复 b、c 过程。直到结果趋于稳定迭代过程。

实际工程应用需要设定**迭代次数**,程序默认 5 次,避免长时间迭代。因为实际工程构件种类多 (钢构件、钢管、组合梁)、受力程度不同,火灾下刚度降低非常复杂,很难得到完全收敛的结果。有 5 次左右的迭代计算,已经非常接近真实结果。

如下图钢框架,分别基于构件、基于整体结构防火验算得到的防护层厚度。两端铰接的次 梁因为是静定结构,防护层厚度相同。而框架柱、框架梁由于内力重分布,防护层厚度不同。



### "整体结构验算"注意事项:

- 1) 防火整体结构验算之后,只看防火结果。因为迭代过程 Strat 计算的构件内力,是考虑火灾高温下内力重分布的结果,已经与常温计算不同。要看常温下的位移、应力比等,需重新 Strat 计算一次。
- 2) 不同时进行"截面优化"。两者进程有冲突,如设置两类同时验算, Archi 将取消防火整体验算。

如需要同时进行两类验算, 可按如下方法:

- a) 首先进行"截面优化", 得到优化后钢截面, 和对应的结构内力。
- b) 仍在 Archi 内,关闭"截面优化"、选中防火"整体结构验算",再一次进行 Archi 构件验算,将得到优化后截面基础上防火整体结构验算结果。
- c) 也可以返回前处理 Prep, 导入 Archi 优化后截面。然后按正常流程先 Strat、后 Archi 计算, 这时单独选中防火"整体结构验算"。

#### ◆ 防火防护层材料类型,及相应参数

按防火规范分类,防护层分3类:

- 1) 膨胀涂料, 防火能力由等效热阻 $R_i$ 度量。
- 2) **轻质**涂料或防护板,如非膨胀型防火涂料、蛙石防火板、硅酸钙防火板、硅酸铝纤维 毡等。需要输入热传导系数 $\lambda_i$ ,等效热阻

$$R_i = d_i/\lambda_i$$
,

其中 $d_i$ 为防护层厚度,由计算确定。

3) **非轻质**防护板,如混凝土面层、金属网抹砂浆、砌体等。除需要输入热传导系数 $\lambda_i$ ,还需输入防火材料密度 $\rho_i$ 和比热容 $c_i$ ,其等效热阻 $R_i$ 包含防火材料自身的吸热

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

#### ◆ 防护层做法

**面喷涂**,或称外边缘型,防火涂料或砂浆沿着钢构件外露表面布置,包括凸面、凹面。

**外包覆**,或称非外边缘型,防火板材按矩形或圆形包覆在钢构件外围。

防护层两种做法,对应防火保护下钢构件的截面形状系数F;/V算法不同。

对于有防护钢构件单位长度的受火表面积 $F_i$ , Archi 判断有楼板搁置的钢梁。对刚性楼面

内、或有混凝土板连接的钢梁, $F_i$ 不计入钢梁截面顶边面积。对钢和混凝土组合梁, $F_i$ 也不计 钢梁顶边面积。

# 2、Archi 钢构件防火验算

#### 2.1 防火验算内力设计值和荷载组合

依据规范,防火验算包含恒、活、风、火灾温度四类荷载,不含地震。且按标准荷载,不 含分项系数,但活、风含频遇系数。

Archi 在基本荷载组合基础上,计算防火荷载组合。基本组合内已设置的"活载互异"、类 型折减等设置,防火会自然继承。Archi 计算书内会输出实际的防火荷载组合。

```
S_{\mathrm{m}} = \gamma_{\mathrm{0T}} (\gamma_{\mathrm{G}} S_{\mathrm{Gk}} + S_{\mathrm{Tk}} + \phi_{\mathrm{f}} S_{\mathrm{Qk}})
                                                  (3, 2, 2-1)
           S_{\rm m} = \gamma_{\rm 0T} (\gamma_{\rm G} S_{\rm Gk} + S_{\rm Tk} + \phi_{\rm g} S_{\rm Qk} + \phi_{\rm w} S_{\rm Wk}) (3.2.2-2)
式中: Sm ——荷载(作用)效应组合的设计值;
     S_{Gk} ——按永久荷载标准值计算的荷载效应值;
     S_{Tk} ——按火灾下结构的温度标准值计算的作用效应值;
           按楼面或屋面活荷载标准值计算的荷载效应值;
          一按风荷载标准值计算的荷载效应值;
         ——结构重要性系数;对于耐火<mark>等级</mark>为一级的建筑,
            \gamma_{\text{OT}} = 1.1;对于其他建筑,\gamma_{\text{OT}} = 1.0;
      \gamma_G ——永久荷载的分项系数, 一般可取 \gamma_G =1.0; 当永久荷
            载有利时,取 \gamma_G = 0.9;
      \phi_w ——风荷载的频遇值系数,取 \phi_w =0.4;
      φ<sub>1</sub> ——楼面或屋面活荷载的频遇值系数,应按现行国家标
            准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定取值;
            -楼面或屋面活荷载的准永久值系数,应按现行国家
            标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定取值。
```

标准组合(承载能力, 防火验算) 

Archi 计算书输出防火组合

#### 2.2 钢梁、钢柱撑

采用规范 7.1 节承载力法,轴压、纯弯、压弯受力下的强度、稳定验算,采用 7.1.1~7.1.6 系列公式,如下图。

```
7.1.1 火灾下轴心受拉钢构件或轴心受压钢构件的强度应按下
                     \frac{N}{A_n} \leqslant f_T
```

7.1.2 火灾下轴心受压钢构件的稳定性应按下列公式

$$\frac{N}{\varphi_{\mathrm{T}}A} \leqslant f_{\mathrm{T}} \tag{7.1.2-1}$$

$$\varphi_{\mathrm{T}} = \alpha_{\mathrm{c}} \varphi \tag{7.1.2-2}$$

 $\varphi_{\Gamma}$  ——高温下轴心受压钢构件的稳定系数;

7.1.3 火灾下单轴受弯钢构件的强度应按下式验算:

$$\frac{M}{\gamma W_{n}} \leqslant f_{T} \tag{7.1.3}$$

7.1.4 火灾下单轴受弯钢构件的稳定性应按下列公式验算:

$$\frac{\Pi}{\varphi_{bT}W} \leqslant f_{T} \qquad (7.1.4-1)$$

$$= \begin{cases} \alpha_{b}\varphi_{b} & \alpha_{b}\varphi_{b} \leqslant 0.6 \\ 1.07 - \frac{0.282}{7.28} \leqslant 1.0 & \alpha_{b}\varphi_{b} > 0.6 \end{cases} (7.1.4-2)$$

-高温下受弯钢构件的稳定系数;

 $\alpha_b \varphi_b$ 

-常温下受弯钢构件的稳定系数,应按现行国家标准 《钢结构设计规范》GB 50017 的规定确定;当  $\varphi_b$  > 6 时, φ<sub>b</sub> 不作修正;

-高温下受弯钢构件的稳定验算参数,应按表 7.1.4 确定。

$$\frac{N}{A_{\rm n}} \pm \frac{M_{\rm x}}{\gamma_{\rm x} W_{\rm nx}} \pm \frac{M_{\rm y}}{\gamma_{\rm y} W_{\rm ny}} \leqslant f_{\rm T} \tag{7.1.5}$$

7.1.6 火灾下压弯钢构件绕强轴 x 轴弯曲和绕弱轴 y 轴弯曲时 的稳定性应分别按下列公式验算:

$$\begin{split} \frac{N}{\varphi_{\text{sT}}A} + \frac{\beta_{\text{mx}}M_{\text{x}}}{\gamma_{\text{x}}W_{\text{x}}(1-0.8N/N'_{\text{ExT}})} + \eta \, \frac{\beta_{\text{ty}}M_{\text{y}}}{\varphi_{\text{ty}} + W_{\text{y}}} \leqslant f_{\text{T}} \\ & (7.1.6-1) \\ N'_{\text{ExT}} = \pi^{2}E_{\text{sT}}A/(1.1\lambda_{\text{x}}^{2}) & (7.1.6-2) \\ \frac{N}{\varphi_{\text{yT}}A} + \eta \, \frac{\beta_{\text{tx}}M_{\text{x}}}{\varphi_{\text{txT}}W_{\text{x}}} + \frac{\beta_{\text{my}}M_{\text{y}}}{\gamma_{\text{y}}W_{\text{y}}(1-0.8N/N'_{\text{EyT}})} \leqslant f_{\text{T}} \\ & (7.1.6-3) \\ N'_{\text{EyT}} = \pi^{2}E_{\text{sT}}A/(1.1\lambda_{\text{y}}^{2}) & (7.1.6-4) \end{split}$$

初始按防火防护层厚度为 0,按升温曲线计算耐火极限 ta 时刻的钢材温度,得到相应高温 下强度设计值 $f_T$ 。再按规范公式计算高温下钢构件强度、稳定验算的应力 $\sigma_T$ 。

 $y_T \leq f_T$ , 则防火验算满足。

如 $\sigma_T > f_T$ 防火验算不满足,需增加防护层厚度 di,重新确定新防护下  $t_d$  时刻钢材温度和相应设计强度 $f_T$ ,并计算钢构件强度和稳定应力。

确定防护层厚度,需多次迭代计算(注意不同于前面"整体结构验算"迭代)。精细调整防护层厚度,直到 $\sigma_T = f_T$ 两者相同或接近,才终止迭代。

#### 要点:

- 1)火灾下 N、M 等内力设计值,少了荷载分项系数,且不含地震作用,会小于常温下设计值。同时高温下材料强度降低,随着防护厚度的增加高温强度会提高。两者增减,决定防火保护层的厚度。
- 2) 如钢截面较小,火灾下应力已经大于常温下强度,即 $\sigma_T > f_a$ ,再增加防护厚度已无效。此时 Archi 将不再迭代确定防护层厚度,直接输出大于 1 的应力比,表明防火不满足。
- 3) 对于膨胀防火涂料,其防火性能直接由等效热阻系数 $R_i$ 确定,没有确切的厚度 $d_i$ 。 Archi 输出结果 $d_i=0$ 。

#### 2.3 钢管混凝土(圆/方)柱撑

钢管混凝土柱撑通过两个综合性指标,火灾下的荷载比R和火灾下承载力系数 $k_T$ ,见下图,验算防火承载力并确定需要的防护层厚度。

荷载比R由火灾下的轴压设计值N、常温下轴压承载力设计值N\*确定。N按火灾荷载组合得到。

对于承载力设计值 $N^*$ ,Archi 方钢管采用《防火》8.1.5 条计算公式,圆钢管采用《组合结构设计规范 JGJ138》8.2 条计算方法以便与常温设计统一。

防火防护层厚度根据防火规范 8.1.8 条、8.1.9 条计算。

由于采用综合指标,钢管混凝土柱撑确定防护层厚度不需迭代计算。

8.1.3 钢管混凝土柱的荷载比应按下式计算:

$$R = \frac{N}{N^{s}} \tag{8.1.3}$$

N — 火灾下钢管混凝土柱的轴压力设计值;

N\* ——常温下钢管混凝土柱的抗压承载力设计值

8.1.6 标准火灾下受火时间小于或等于 3.0h 的无防火保护圆钢管混凝土柱,其火灾下的承载力系数  $k_T$  可按式(8.1.6-1)计算,也可按本规范附录 B 查表确定;对于非标准火灾,式(8.1.6-1)中的受火时间 t 应取等效曝火时间。

$$k_{\mathrm{T}} = \begin{cases} \frac{1}{1 + at_{0}^{2.5}} & t_{0} \leqslant t_{1} \\ \frac{1}{1 + at_{1}^{2.5} + b(t_{0} - t_{1})} & t_{1} < t_{0} \leqslant t_{2} \\ \frac{1}{1 + at_{1}^{2.5} + b(t_{2} - t_{1})} + k(t_{0} - t_{2}) & t_{0} > t_{2} \end{cases}$$
(8.1.6-1)

8.1.7 标准火灾下受火时间小于或等于 3.0h 的无防火保护矩形钢管混凝土柱,其火灾下的承载力系数  $k_{\text{T}}$  可按式(8.1.7-1)计算,也可按本规范附录 B 查表确定;对于非标准火灾,式(8.1.7-1)中的受火时间 t 应取等效曝火时间。

$$k_{\mathrm{T}} = \begin{cases} \frac{1}{1 + at_{0}^{2}} & t_{0} \leqslant t_{1} \\ \frac{1}{b t_{0}^{2} + 1 + (a - b)t_{1}^{2}} & t_{1} < t_{0} \leqslant t_{2} \\ \frac{1}{b t_{0}^{2} + 1 + (a - b)t_{0}^{2}} + k(t_{0} - t_{2}) & t_{0} > t_{2} \end{cases}$$
(8.1.7-1)

#### 2.4 钢和混凝土组合梁

采用规范 8.3 节承载力法验算组合梁。组合梁直接采用火灾下正弯矩设计值 M,与火灾下跨中正弯承载力 $M_T$ 和端部负弯承载力 $M_T$ 之和的比值。

**8.3.1** 火灾下钢与混凝土组合梁的承载力验算,两端铰接时,应按式(8.3,1-1)进行;两端刚接时,应按式(8.3,1-2)进行。

$$M \leqslant M_{\mathrm{T}}^{+} \tag{8.3.1-1}$$

 $M \leqslant M_{\rm T}^+ + M_{\rm T}^-$  (8.3.1-2)

式中: M — 火灾下组合梁的正弯矩设计值;

M; ——火灾下组合梁的正弯矩承载力;

M<sub>T</sub> ——火灾下组合梁的负弯矩承载力。

与钢梁柱类似,组合梁承载力由火灾高温下钢材强度 $f_T$ 和混凝土强度 $f_{CT}$ 确定,其护层厚度的确定需要多次迭代计算。

组合梁混凝土翼板的火灾温度按防火规范 8.3.4 表确定。

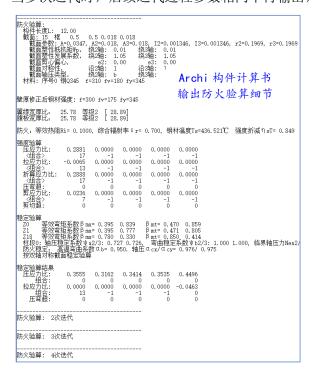
组合梁钢构件的截面形状系数 $F_i/V$ 中的受火表面积 $F_i$ ,不计顶面与混凝土翼板截面部分。

# 3、Archi 钢构件防火验算结果查看

#### 3.1 构件计算书输出验算过程

Archi 构件计算书,可以查看详细钢构件防火验算过程。

当多次迭代时,后续迭代过程参数相同不再输出,以加快速度。



#### 从构件计算书看规范验算细节

Archi 构件计算书是非常重要的 文档,详细输出了一类构件进行各类 规范验算的全部细节过程,例如工况 内力调整、工况组合、设计内力强柱 弱梁/强剪弱弯、砼柱附加弯矩、钢 梁柱稳定系数,等等。

通过构件计算书,可以核查一个 构件的验算细节,了解 JG 软件技术 全面且严密的验算过程。

通过构件计算书,还可以了解规 范规定在单个构件上的实现过程,加 深对规范原则、方法的认识。

#### 3.2 防火验算结果

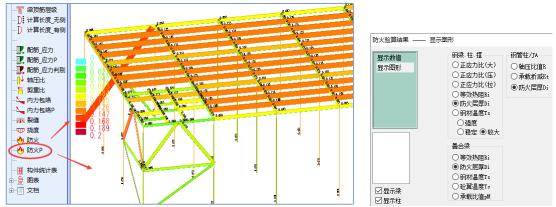
Archi 图形输出防火验算结果,分直方图模式、数值模式两种图形。

直方图模式直观展示结果的分布、各构件的相对大小,看整体趋势。数值模式可以同时显示多种参数的具体数值,看具体细节。两图可以相互补充,可按 Tab 键快速切换。

两种模式均有对应对话框设置,F5 热键或"Shift+右键"调用。在数值模式图中,选中"符号提示"、并结合开、关某一项参数,了解图形数值的含义。

Archi 图形结果可以结合构件计算书,详细了解单个钢构件的防火验算过程。

Archi 防火验算结果图形(数值)显示,和对应图形设置 (F5/Shift+右键)



Archi 防火验算结果图形(直方图)显示,和对应图形设置 (F5/Shift+右键)