无机胶粘贴碳纤维布加固板防火涂层厚度取值

万夫雄[1,2], 郑文忠[1]

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨, wanfuxiong2011@163.com;
2. 昆明理工大学 建筑工程学院, 650000 昆明)

摘 要: 为确保火灾下用无机胶粘贴的碳纤维布能正常发挥加固作用,保证结构安全,需要选用一定厚度的厚型防火涂料作为碳纤维布的防火保护层. 基于对加固板高温变形限制的考虑,采用 ABAQUS 对其高温变形进行试算,提出以板底温度 415 ℃作为控制温度计算涂料厚度的原则. 采用 ABAQUS 对加固板温度场进行分析,表明涂料厚度、导热系数以及受火时间是影响板底温度的主要因素,因而决定涂料保护层厚度的关键因素为导热系数和受火时间. 在此基础上,按耐火时间和涂料导热系数的不同,分涂料品种并考虑相应构造要求的基础上,给出基于温度控制的防火涂料保护层厚度取值建议.

关键词: 无机胶;碳纤维布;加固板;防火涂料;防火保护
中图分类号: TU375.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)02-0011-06

Thickness value of fireproof coating for slabs strengthened with Carbon Fiber Sheet bonded with an inorganic adhesive

WAN Fu-xiong[1,2], ZHENG Wen-zhong[1]

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, wanfuxiong2011@163.com;
2. Architectural and Civil Engineering Institute, Kunming University of Science and Technology, 650000 Kunming, China)

Abstract: For keeping strengthening role of Carbon Fiber Sheet (CFS) bonded with an inorganic adhesive to insure fire safe of structure, thick-typed fireproof coating is needed for protecting CFS. Considering deformation limit of strengthened slabs in fire, temperature on bottom surface of slabs is limited to 415 ℃ by trial calculation of deformation by ABAQUS. By analysis of temperature field of strengthened slabs by ABAQUS, fireproof coating thickness, heat conductivity coefficient and fire duration are the main factors affecting temperature on bottom surface of strengthened slabs, so key factors affecting fireproof coating thickness are heat conductivity coefficient and fire duration. Based on that, in terms of fire endurance and thermal conductivity coefficient of coating, and considering actual construction demand, advised values of fireproof coating thickness are proposed in terms of different type of coating.

Key words: inorganic adhesive; Carbon Fiber Sheet (CFS); strengthened slabs; fireproof coating; fire protection

目前粘贴碳纤维布加固混凝土结构多采用环氧类有机胶. 但有机胶软化温度多为 60 ~ 80 ℃[1-2],即使采取严密的防火措施,在火灾下有机胶也极易超过其软化温度[3-5],使得碳纤维布在火灾下不能发挥加固作用. 为此,进行了开发耐高温无机胶的探索,获得了 600 ℃时强度不低于常温强度的无机胶,采用该无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土受弯构件是完全可行的[6]. 但考虑到高温时碳纤维布在绝氧条件下强度降低非常缓慢,而在有氧环境下易被氧化致使其强度急剧降低的特点,需要选用防火涂料对其进行防火保护. 厚型钢结构防火涂料和厚型隧道防火涂料均能达

收稿日期: 2010-12-07.
基金项目: 教育部长江学者奖励计划资助项目(2009-37);教育部博士点基金资助项目(20092302110046).
作者简介: 万夫雄(1978—),男,博士;
郑文忠(1965—),男,博士生导师,长江学者特聘教授.

到对碳纤维布实现绝氧和控温的目的[7]. 但当防火涂料承受较大的弯曲变形,即跨中位移为计算跨度的1/44时,涂料会产生弯曲裂缝,进而将碳纤维布暴露在火场中,达不到绝氧的目的. 因此需要对构件变形进行控制,而要控制变形,就要对板内温度进行控制. 为此,本文首先根据变形限制,通过反复试算选定板底控制温度,然后分析影响板底温度的主要因素,找出影响防火涂料保护层厚度的关键因素,最后通过大量计算给出基于温度控制并考虑构造要求的防火涂料保护层厚度取值建议.

1 控制温度的确定

当加固板的跨中位移小于计算跨度的1/44时,涂料才能避免弯曲开裂,碳纤维布才能保持绝氧状态. 因此,需寻找加固板的板底控制温度,使得加固板在该温度下其跨中位移为计算跨度的1/44. 为此不断假定板底温度,计算在每个假定板底温度下加固板的变形. 而在板底温度一定的情况下,影响加固板火灾下变形的因素有碳纤维布加固提高幅度、纵向受力钢筋配筋率、荷载水平和截面尺寸,需要从中选取主要参数并考虑其最不利情况(使得加固板变形最大的参数取值)计算加固板在火灾下的最大变形,为此需进行参数分析.

设计计算跨度为4 000 mm的简支单向板,底部配置HPB235纵向钢筋,板底粘贴碳纤维布,板面均布加载. 采用国际标准升温曲线ISO834升温90 min,板底单面受火,采用厚型防火涂料对板底进行防火保护. 加固板的初始设计参数为:截面尺寸为600 mm × 120 mm,碳纤维布提高幅度为30%,纵向受力钢筋的配筋率为0.3%,荷载水平为0.55,防火涂料计算厚度为8 mm,防火涂料的导热系数为0.12 $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$,密度为600 $kg \cdot m^{-3}$,比热为1 000 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$. 为考察碳纤维布的加固提高幅度、纵向受力钢筋配筋率、荷载水平和板厚度等各参数对加固板变形的影响规律,在每个参数合理取值范围内逐步改变其值而保持其他参数不变进行计算分析.

采用ABAQUS的顺序耦合热应力分析方法进行变形分析. 选取ABAQUS提供的塑性损伤模型、线弹性模型和理想弹塑性模型分别来定义混凝土、碳纤维布和钢筋的材料力学行为. 混凝土塑性损伤模型为连续的、基于塑性的混凝土损伤模型.

1.1 单轴力学行为

根据定义的各温度下应力与塑性应变数据,ABAQUS自动将其转化为应力与等效塑性应变关系曲线,并用率应力应变关系表述,其表达式为

$$\begin{cases}\sigma_t = \sigma_t(\tilde{\varepsilon}_t, \dot{\tilde{\varepsilon}}_t, \theta),\\ \sigma_c = \sigma_c(\tilde{\varepsilon}_c, \dot{\tilde{\varepsilon}}_c, \theta).\end{cases}$$

式中:$\tilde{\varepsilon}_t$,$\tilde{\varepsilon}_c$分别为等效塑性拉伸应变与压缩应变;$\dot{\tilde{\varepsilon}}_t$,$\dot{\tilde{\varepsilon}}_c$分别为等效塑性拉伸应变率与压缩应变率;$\theta$为温度.

1.2 基于Drucker-Prager强度准则的屈服函数

在复杂应力状态下,屈服面是通过有效压应力和有效拉应力来控制的,其表达式为

$$F(\bar{\sigma}) = \frac{1}{1-\alpha}[\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta\langle\bar{\sigma}_{max}\rangle - \gamma\langle-\bar{\sigma}_{max}\rangle] - \bar{\sigma}_c.$$

式中:$\bar{p}$为有效静水压应力,$\bar{p} = -\frac{1}{3}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3)$,$\bar{\sigma}_1$、$\bar{\sigma}_2$、$\bar{\sigma}_3$分别为3个等效主应力;$\bar{q}$为Mises等效有效应力,$\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2}s_{ij}s_{ji}}$,其中$s_{ij}$、$s_{ji}$为偏应力张量;$\bar{\sigma}_{max}$为有效主应力中的最大值,$\langle\cdot\rangle$可以用$\langle x\rangle = (|x| + x)/2$表示;$\alpha$、$\beta$、$\gamma$为无量纲常数,表达式分别为$\alpha = \frac{\sigma_{bo} - \sigma_{co}}{2\sigma_{bo} - \sigma_{co}}$,$(0 \leqslant \alpha \leqslant 0.5)$,其中$\sigma_{bo}$、$\sigma_{co}$分别为双轴、单轴受压时初始屈服应力,$\beta = (1-\alpha)(\bar{\sigma}_c/\bar{\sigma}_t) - (1+\alpha)$,其中$\bar{\sigma}_c$、$\bar{\sigma}_t$分别为受压和受拉的有效粘聚应力,$\gamma = \frac{3(1-K_c)}{2K_c - 1}$,对于混凝土,材料参数$K_c$可取为2/3.

1.3 流动法则

模型的塑性流动法则为基于Drucker-Prager流动面的非关联流动,其表达式为

$$d\varepsilon = d\lambda \frac{\partial G(\bar{\sigma})}{\partial \bar{\sigma}}, \tag{1}$$

式中:$d\varepsilon$为塑性应变增量;$d\lambda$为非负的塑性加载系数;$G(\bar{\sigma})$为势能函数.

势能函数$G(\bar{\sigma})$为Drucker-Prager抛物线函数,其表达式为

$$G(\bar{\sigma}) = \sqrt{(\varepsilon\sigma_{t0}\tan\psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p}\tan\psi.$$

式中:σ_{t0}为单轴极限拉应力;ψ为$p-q$平面上高围压下的剪胀角;ε为偏移量参数,给出了函数趋向于渐近线的速率(当该值趋向于零时,流动势渐近于直线). 在ABAQUS中,偏移量参数ε的默认值为0.1.

由于塑性流动是非关联的,应用损伤塑性模型将使材料刚度矩阵为非对称阵. 因此,在ABAQUS/Standard中为得到可接受的计算收敛速度,应采用非对称矩阵存储和非对称计算方法求解.

1.4　硬化法则

塑性应变增量为

$$\mathrm{d}\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = h(\bar{\sigma})\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon},$$

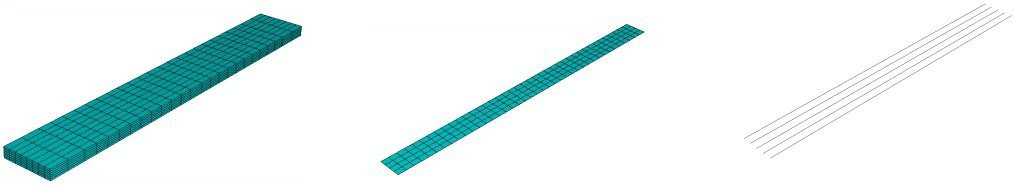
式中：$\mathrm{d}\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 为等效塑性应变增量，$\mathrm{d}\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = [\mathrm{d}\bar{\varepsilon}_{\mathrm{t}} \quad \mathrm{d}\bar{\varepsilon}_{\mathrm{c}}]^{\mathrm{T}}$；$\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}$ 为塑性主应变增量，$\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon} = [\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}_1 \quad \mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}_2 \quad \mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}_3]^{\mathrm{T}}$，可按式（1）计算；$\boldsymbol{h}(\bar{\sigma})$ 为权重矩阵，$\boldsymbol{h}(\bar{\sigma}) = \begin{bmatrix} \gamma(\bar{\sigma}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(1-\gamma(\bar{\sigma})) \end{bmatrix}$，其中 $\gamma(\bar{\sigma})$ 为应力权重因子，$\gamma(\bar{\sigma}) = \sum_{i=1}^{3}\langle\bar{\sigma}_i\rangle \Big/ \sum_{i=1}^{3}|\bar{\sigma}_i|$，$0 \leqslant \gamma(\bar{\sigma}) \leqslant 1$，当所有等效主应力为正时，该值为 1，当所有等效主应力为负时，该值为 0.

碳纤维布的线弹性模型表达式为

$$\sigma = E\varepsilon.$$

式中：ε 为应变，E 为常数弹性模量，σ 为应力.

结构分析中选取 8 节点的三维实体单元 C3D8R、4 节点的三维壳单元 S4R 和两节点的三维杆单元 T3D2 来分别模拟混凝土、碳纤维布和钢筋，钢筋部件埋置在混凝土部件中，碳纤维布部件贴在混凝土板底. 加固板的有限元模型网格划分见图 1.



（a）混凝土部件　　（b）碳纤维布部件　　（c）钢筋部件

图 1　板的网格

相关计算参数取值：

1）高温下混凝土抗压强度 $f_{\mathrm{c}}(\theta)$ 为[8]

$$\frac{f_{\mathrm{c}}(\theta)}{f_{\mathrm{c}}} = \frac{1}{1 + 18\left(\dfrac{\theta}{1\,000}\right)^{5.1}},$$

式中：f_{c} 为常温下混凝土轴心抗压强度，θ 为温度.

2）高温下混凝土抗拉强度 $f_{\mathrm{t}}(\theta)$ 为[8]

$$\frac{f_{\mathrm{t}}(\theta)}{f_{\mathrm{t}}} = 1 - \frac{\theta}{1\,000}.$$

式中 f_{t} 为常温下混凝土轴心抗拉强度.

3）高温下混凝土弹性模量 $E_{\mathrm{c}}(\theta)$ 为[8]

$$\frac{E_{\mathrm{c}}(\theta)}{E_{\mathrm{c}}} = 0.83 - 1.1 \times 10^{-3}\theta, 60\ ℃ \leqslant \theta \leqslant 700\ ℃.$$

式中 E_{c} 为常温时混凝土弹性模量.

4）高温下混凝土的受压应力应变关系为[8]

$$\sigma_{\mathrm{c}}(\theta) = f_{\mathrm{c}}(\theta)\left[2.2\frac{\varepsilon_{\mathrm{c}}(\theta)}{\varepsilon_0(\theta)} - 1.4\left(\frac{\varepsilon_{\mathrm{c}}(\theta)}{\varepsilon_0(\theta)}\right)^2 + 0.2\left(\frac{\varepsilon_{\mathrm{c}}(\theta)}{\varepsilon_0(\theta)}\right)^3\right],$$

$$0 < \varepsilon_{\mathrm{c}}(\theta) \leqslant \varepsilon_0(\theta);$$

$$\sigma_{\mathrm{c}}(\theta) = f_{\mathrm{c}}(\theta)\frac{\varepsilon_{\mathrm{c}}(\theta)/\varepsilon_0(\theta)}{0.8[\varepsilon_{\mathrm{c}}(\theta)/\varepsilon_0(\theta) - 1]^2 + \varepsilon_{\mathrm{c}}(\theta)/\varepsilon_0(\theta)},$$

$$\varepsilon_{\mathrm{c}}(\theta) > \varepsilon_0(\theta),$$

$$\varepsilon_0(\theta) = \left[1 + 5\left(\frac{\theta}{1\,000}\right)^{1.7}\right]\varepsilon_0.$$

式中：$\sigma_{\mathrm{c}}(\theta)$、$\varepsilon_{\mathrm{c}}(\theta)$ 分别为高温下混凝土应力和应变，$\varepsilon_0(\theta)$、ε_0 分别为高温下和常温时混凝土峰值应变.

5）高温下混凝土热膨胀系数 α_{c} 为[8]

$$\alpha_{\mathrm{c}} = 28\left(\frac{\theta}{1\,000}\right) \times 10^{-6}, \theta < 650\ ℃.$$

6）高温下钢筋屈服强度 $f_y(\theta)$ 为[8]

$$\frac{f_y(\theta)}{f_y} = \frac{1}{1 + 24\left(\dfrac{\theta}{1\,000}\right)^{4.5}},$$

式中 f_y 为常温下钢筋的屈服强度.

7）高温下钢筋弹性模量 $E_{\mathrm{s}}(\theta)$ 为[8]

$$\frac{E_{\mathrm{s}}(\theta)}{E_{\mathrm{s}}} = \frac{1}{1.36 + 32.64\left(\dfrac{\theta}{1\,000}\right)^{4.5}},$$

式中 E_{s} 为常温时钢筋的弹性模量.

8）高温下钢筋受拉应力应变关系为[9]

$$\sigma_{\mathrm{s}}(\theta) = \begin{cases} f_y(\theta)\varepsilon_{\mathrm{s}}(\theta)/0.002, & 0 < \varepsilon_{\mathrm{s}}(\theta) \leqslant 0.002; \\ f_y(\theta), & 0.002 < \varepsilon_{\mathrm{s}}(\theta) \leqslant 0.015. \end{cases}$$

式中 $\sigma_{\mathrm{s}}(\theta)$、$\varepsilon_{\mathrm{s}}(\theta)$ 分别为高温下钢筋应力和应变.

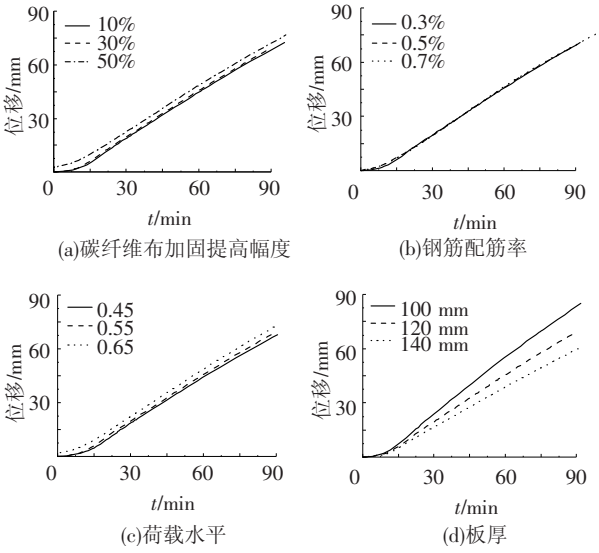
9）高温下钢筋线膨胀系数 α_{s} 为[8]

$$\alpha_{\mathrm{s}} = 0.5\sqrt{\theta} \times 10^{-6}.$$

10）当碳纤维布采用耐高温的无机胶加以浸润后，碳纤维丝由无机胶连成整体，碳纤维布的主要成分包括碳纤维丝和无机胶，在碳纤维采取有效方式避免氧化的情况下，碳纤维布力学性能主要由无机胶的高温性能决定. 无机胶在 600 ℃ 以前强度并不降低. 因此，可认为碳纤维布的力学性能并无退化，与常温时相同，其弹性模量取为

2.42 × 10 MPa，极限抗拉强度取为 4 223 MPa[7].

图 2 为碳纤维布加固提高幅度、钢筋配筋率、荷载水平和板厚对加固板跨中位移的影响. 板厚是影响加固板高温变形的主要因素，碳纤维布加固提高幅度、钢筋配筋率和荷载水平的影响很小. 这主要是因为当板内温度较小时，板的变形以膨胀变形为主，厚度越小，板内温度梯度越大，膨胀变形越大，总的变形越大. 实际工程中，一般板厚均在 100 mm 以上，因此本文偏安全地选用板厚为 100 mm，计算分析与板底温度对应的加固板最大跨中位移. 经过大量试算发现，当板底温度为 415 ℃ 时，加固板火灾下最大跨中位移约为 90 mm，约为计算跨度 1/44. 因此，本文将加固板的板底控制温度设为 415 ℃.



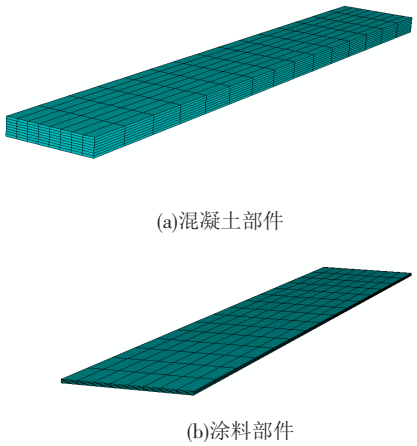
(a)碳纤维布加固提高幅度　(b)钢筋配筋率

(c)荷载水平　(d)板厚

图 2　各参数对加固板火灾下变形的影响

2　影响涂料厚度取值的关键因素

当板底控制温度设定之后，防火涂料厚度取值与哪些因素有关需要分析，因此从影响板底温度的因素出发，确定影响涂料厚度取值的关键因素. 为此，设计了截面厚度为 120 mm 的板，采用厚型防火涂料进行防火保护. 防火涂料厚度、导热系数、比热和密度初始值分别为 8 mm、0.12 W · K^{-1} · m^{-1}、1 000 J · kg^{-1} · K^{-1} 和 600 kg · m^{-3}. 升温曲线采用 ISO834 标准升温曲线，板底单面受火. 采用 ABAQUS 建立三维实体模型进行温度场分析. 由于碳纤维布厚度很薄，对温度的影响较小，建模时不考虑碳纤维布. 采用 8 节点实体单元 DC3D8 来模拟混凝土和防火涂层. 混凝土板和防火涂层按部件建模并进行组装，将两者接触面贴在一起，网格划分见图 3. 划分网格后采用 ABAQUS/Standard 进行求解计算.



(a)混凝土部件

(b)涂料部件

图 3　板的网格

相关计算参数取值如下：

1)混凝土的导热系数 λ_c 为[10]

$$\lambda_c = 2 - 0.24\left(\frac{\theta}{120}\right) + 0.012\left(\frac{\theta}{120}\right)^2.$$

2)混凝土密度 $\rho_c = 2\ 400\ \mathrm{kg/m^3}$，比热 C_c 为[10]

$$C_c = 900 + 80\left(\frac{\theta}{120}\right) - 4\left(\frac{\theta}{120}\right)^2,$$

$$20\ ℃ < \theta < 1\ 200\ ℃.$$

3)混凝土内部水份的考虑

假定水份在温度达到 100 ℃ 时全部蒸发掉. 水份在 100 ℃ 以下的热工参数按下式计算

$$\rho_w C_w = 4.2 \times 10^6.$$

式中：ρ_w 和 C_w 分别为水的密度(kg/m^3)和比热(J/(kg · K)).

计算时假定混凝土所含水份的质量百分比为 5%，对其热工性能做如下修改

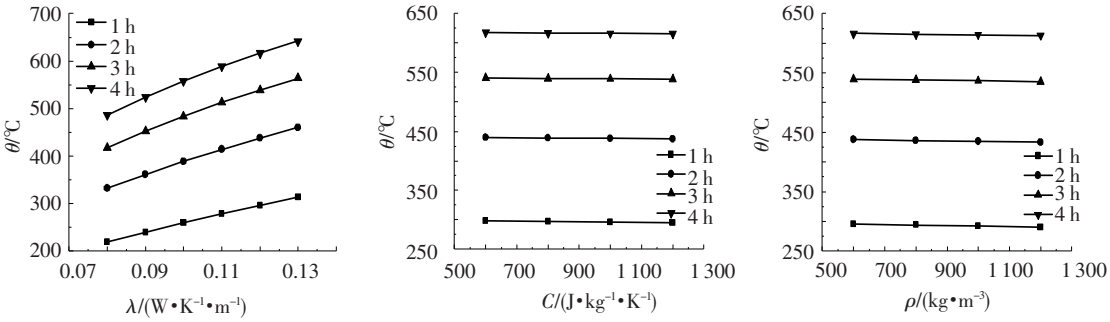
$$\rho'_c C'_c = \begin{cases} 0.95\rho_c C_c + 0.05\rho_w C_w, & \theta < 100\ ℃; \\ \rho_c C_c, & \theta \geqslant 100\ ℃. \end{cases}$$

式中：ρ'_c 和 C'_c 分别为考虑水份影响后混凝土密度和比热；ρ_c 和 C_c 为不考虑水份影响的混凝土密度和比热.

4)试件背火面和迎火面的热对流系数分别取 9 W/(m^2 · ℃) 和 25 W/(m^2 · ℃)，热辐射率均取为 0.7[11].

2.1　防火涂料热工参数对板底温度的影响

以防火涂料导热系数、比热和密度为变化参数，每次改变一个参数而保持其他参数不变，研究其对温度的影响. 图 4 为不同受火时间时防火涂料热工参数对板底温度的影响. 随着导热系数增大，板底温度不断升高，但升高幅度逐渐变缓. 涂料导热系数越小，升温时间越长，导热系数影响越显著. 比热和密度大小对板底温度影响很小.



(a)导热系数　(b)比热　(c)密度

图 4　板底温度随涂料热工参数变化规律

2.2　防火涂料厚度对板底温度的影响

图 5 为不同受火时间时防火涂料厚度对板底温度的影响. 可以看到，随着涂料厚度的增加，板底温度不断降低，但降低幅度逐渐变缓.

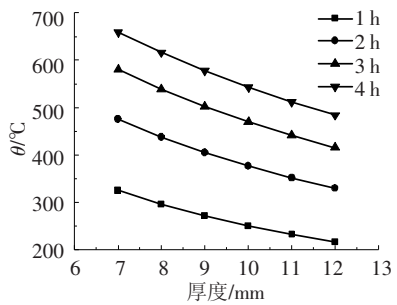


图 5　板底温度随涂料厚度变化规律

2.3　板厚对板底温度的影响

图 6 为不同受火时间时板厚对板底温度的影响. 可以看到，板厚对板底温度影响很小.

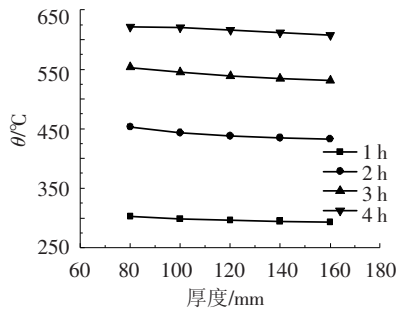


图 6　板底温度随板厚的变化规律

2.4　受火时间对板底温度的影响

板底温度随受火时间的变化情况如图 7 所示. 可以看到，板底温度随受火时间的延长呈非线性增长趋势.

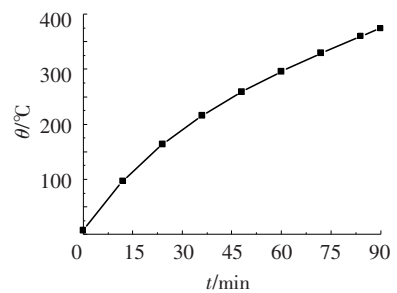


图 7　板底温度随受火时间的变化规律

以上分析表明，涂料厚度、导热系数以及受火时间是影响板底温度的主要因素，因此决定涂料保护层厚度的关键因素为导热系数和受火时间.

3　加固板防火涂料保护层厚度取值

根据《建筑设计防火规范》(GB50016—2006)的规定，与板的耐火等级相对应，将加固板的耐火时间分为 30、60、90 min3 档. 防火涂料导热系数的取值范围设定为 0.06 ~ 0.16 $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$. 根据设定的防火涂料导热系数的取值范围和耐火时间，通过大量计算，可得加固板防火涂料厚度的计算值，见表 1.

为了防止涂料火灾下的整体脱落，防火涂层内需要设置钢丝网以加强防脱落的构造措施[9]. 防火涂料分内外两层设置，内层采用喷涂的方式设置，待内层涂料干燥后挂钢丝网，然后涂抹外层涂料. 内层涂料最小需 2 mm 厚，外层涂料由于要完全覆盖钢丝网，至少需要 8 mm 厚，因此总的涂料厚度至少需要 10 mm. 根据文献[7]可知，受火 90 min 后，隧道防火涂层有 2 mm 的脱落厚度，而钢结构防火涂料其外层涂料已脱落，即有 8 mm 的脱落厚度，因此实际设置的防火涂料厚度还需考虑以上脱落情况. 外层涂料的脱落，一方面是由涂料自身的高温性能决定，即涂料高温干缩引起开裂而脱落，以及高温下自身粘结强度减弱导致脱落；另一方面往往始于钢丝网高温膨胀所导致的涂料起鼓. 厚型钢结构防火涂料火灾下更易脱落和开裂，除去两者组成成分的差异外，其主要原因如下：由于钢结构表面的憎水性，厚型钢结构防火涂料内的粘结胶含量一般较少，导致涂料本身的粘结性和抗拉性能较差，火灾下涂料易脱落和开裂. 而隧道防火涂料专为隧道混凝土研制，由于混凝土表面的亲水性，涂料内的粘结胶含量较高，使得涂料的自身粘结强度较大，火灾下不易开裂和脱落. 为此，分别按厚型隧道防火涂料和厚型钢结构防火涂料对表 1 中的计算值进行修正，修正后得到实际所需的防火涂料保护层厚度建议值见

表2.可看到,对厚型隧道防火涂料而言,加固板防火涂料的厚度基本为最小厚度8 mm;对厚型钢结构防火涂料而言,加固板防火涂料的厚度由计算值和构造要求(即考虑最小厚度要求和脱落影响)共同决定,随着导热系数的增大和受火时间的延长逐渐增大.

表1 加固板防火涂料保护层厚度计算值 mm

t/min	导热系数/(W·K^{-1}·m^{-1})										
	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16
30	≤2	≤2	≤2	≤2	3	3	3	3	3	3	3
60	3	3	4	4	5	5	5	6	6	7	7
90	4	5	5	6	6	7	8	8	9	9	10

表2 加固板防火涂料保护层厚度建议值 mm

涂料品种	t/min	导热系数/(W·K^{-1}·m^{-1})										
		0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16
厚型隧道防火涂料	≤60	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	90	10	10	10	10	10	10	11	11	11	11	12
厚型钢结构防火涂料	30	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	60	11	11	12	12	13	13	13	14	14	15	15
	90	12	13	13	14	14	15	16	16	17	17	18

注:受火时间为30 min时,厚型防火涂料仅按最小厚度要求设置,不考虑涂料的脱落情况.

4 结 论

1)基于对加固板变形限制的考虑,提出以板底温度415 ℃为控制温度来计算涂料厚度的原则.

2)决定涂料保护层厚度的关键因素为导热系数和受火时间.按不同的耐火时间和不同的涂料导热系数,分防火涂料类型考虑构造要求,提出了加固板防火涂料保护层厚度取值建议.

参考文献:

[1] GAMAGE J C P H, AI-MAHAIDI R, WONG M B. Bond characteristics of CFRP plated concrete member under elevated temperatures[J]. Composite Structures, 2006,75(1/2/3/4):199-205.

[2] TOMMASO A D, NEUBAUER U, PANTUSO A, *et al*. Behavior of adhesively bonded concrete-CFRP jonints at low and high temperratures[J]. Mechanics of Composite Materials, 2001,37(4):327-338.

[3] KODUR V K R, BISBY L A, GREEN M F. Experimental evaluation of the fire behaviour of insulated fibre-reinforced-polymer-strengthened reinforced concrete columns [J]. Fire Safety Journal, 2006,41(7):547-557.

[4] WILLIAMS B K, BISBY L A, KODUR V K R, *et al*. Fire insulation schemes for FRP-Strengthened concrete slabs[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006,37(8):1151-1160.

[5] WILLIAMS S B. Fire performance of FRP-strengthened reinforced concrete flexural members[D]. Canada: Queen's University, 2004.

[6] 郑文忠, 陈伟宏, 王明敏. 用无机胶粘贴CFRP布加固混凝土梁受弯试验研究[J]. 土木工程学报, 2010,43(4):37-45.

[7] 郑文忠, 万夫雄, 李时光. 用无机胶粘贴CFRP布加固混凝土板抗火性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010,31(10):89-97.

[8] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003:10-65.

[9] 朱伯龙, 陆洲导, 胡克旭. 高温(火灾)下混凝土与钢筋的本构关系[J]. 四川建筑科学研究, 1990(1):37-43.

[10] Eurocode 2: Design of Concrete Structures-Part1-2: General Rules-Structural Fire Design[S]. British Standards Institution, London, British, 1996:1-76.

[11] ELLOBODY E, BAILEY C G. Modelling of unbonded post-tensioned concrete slabs under fire conditions[J]. Fire Safety Journal, 2009,44(2):159-167.

(编辑 赵丽莹)