

火灾下 CFRP 加固 RC 梁高温抗弯承载力简化计算方法

郝建文¹, 董 坤^{1*}, 蒋济同¹, 胡克旭²

(1. 中国海洋大学工程学院, 青岛 266100; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 火灾下粘贴碳纤维复材(CFRP)加固构件的承载力计算是对其进行抗火设计的关键。采用数值模拟手段进行了标准火灾下单面和三面受火的 CFRP 加固钢筋混凝土(RC)梁温度场分析,考虑温度场的主要影响因素(保护材料厚度和导热系数),提出了加固构件表面及内部温度简化计算公式,并与试验数据对比验证了简化公式的准确性。结合混凝土梁截面承载力极限状态分析方法,材料及界面性能高温退化模型,建立了在 ISO 834 标准火灾情况下不同时刻 CFRP 加固 RC 梁高温抗弯承载力简化计算方法,并与荷载效应进行对比,即可进行防火保护材料厚度的合理选择。该研究成果可用于建立 CFRP 加固钢筋混凝土梁的火灾保护设计方法,或判断已有保护措施的 CFRP 加固梁是否能达到要求的耐火极限,能够为 CFRP 加固构件的抗火设计和安全鉴定提供理论手段和方法。

关键词: 混凝土结构; 纤维加固; 承载力; 火灾; 计算方法; 复合材料

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-8000(2020)06-0010-08

1 前 言

CFRP 加固技术具有轻质高强、耐久性好以及施工方便等优点,在混凝土结构加固工程中得到了广泛的推广应用^[1-6]。但是,CFRP 加固混凝土结构在没有防火保护下的耐火性能是极差的,存在火灾安全隐患,因此需要进行必要、合理的防火保护。在防火保护设计工作中,准确地把握构件在火灾下的温度场变化是对其进行结构火灾反应分析的前提,准确地计算火灾不同时刻构件的承载力则是进行结构防火保护设计的关键。

对于 CFRP 加固混凝土构件的温度场计算,现有研究大多基于试验拟合、编程或者数值模拟进行分析。Abbasi 等^[7]基于对火灾试验结果的拟合,给出了在 ISO 834 标准火灾升温曲线下的 FRP 筋加固混凝土梁的温度预测方法,但该方法由于试验条件的限制,并不具备普遍适应性;董坤等^[8]运用 ANSYS 有限元程序对 CFRP 加固 RC 梁温度场的影响因素进行了分析;Gao 等^[9]基于有限单元法和有限差分法的混合解法,编制了带防火保护的 CFRP 加固 RC 梁火灾下温度场分析程序,通过合理的参数设置,这种方法能够很好地模拟构件温度场,但是模拟分析过程相对复杂,且对于不同截面和不同材料参数需要

单独建模,不够便捷;刘汾涛等^[10]提出了三面受火且设有防火保护层的 CFRP 加固混凝土梁截面温度场的实用计算方法,但并没有建立温度场及其主要影响因素(保护材料厚度和导热系数)之间的关系。

此外,国内外大量学者依据火灾试验,结合数值模拟,对设有防火保护层的 CFRP 加固混凝土构件的耐火极限和高温抗弯承载力计算方法进行了部分研究。吴波等^[11]编制了碳纤维布加固钢筋混凝土梁的耐火极限分析程序,对跨高比、防火涂料厚度、受拉纵筋配筋率、碳纤维布加固量、混凝土保护层厚度、荷载比等参数进行了程序编制,给出了 CFRP 加固混凝土梁耐火极限的简化预测方法;刘汾涛等^[12]通过引入混凝土高温等效抗压强度,建立了加固梁抗弯承载力随升温时间的定量衰减关系;Kodur 等^[13]通过将防火涂层等效成混凝土层的方法,对钢筋混凝土梁耐火性能预测方法进行拓展^[14],给出了 CFRP 加固混凝土梁耐火性能的预测方法。但上述学者的研究中未考虑高温下 CFRP-混凝土的界面粘结-滑移效应,与构件的真实力学状态存在差异。Chowdhury 等^[15]、Kodur 等^[16]建立基于纤维截面的分析模型来预测火灾下 FRP 加固混凝土梁、柱的耐火性能;Gao 等^[17]基于性能设计的思想,针对 CFRP 加固混凝土

收稿日期: 2019-09-23

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2019M652477);中央高校基本科研业务费专项(841813023);青岛市博士后研究人员应用研究项目(861905042002)

作者简介: 郝建文(1995-),男,硕士研究生,主要从事复合材料加固结构性能方面的研究。

通讯作者: 董坤(1987-),男,讲师,博士,主要从事 FRP 加固结构及结构抗火方面的研究, dongkun2012@163.com。

梁提出了基于性能的二等级耐火设计思路及耐火极限简化计算方法。

本文首先通过有限元数值分析提出了单面标准火灾下构件表面和内部温度场与其主要影响因素之间的关系公式,继而提出了三面受火条件下 CFRP 加固 RC 梁温度场的计算公式;进一步根据材料性能高温退化模型,建立了 CFRP 加固混凝土梁构件在标准火灾升温曲线下给定时刻的高温抗弯承载力计算公式;最后,通过高温抗弯承载力与外部荷载效应的对比,合理选择防火保护材料厚度。

2 CFRP 加固 RC 梁截面温度计算方法

2.1 有限元模型建立及验证

本文选用大型商业有限元软件 ABAQUS 进行有限元数值模拟分析。在进行有限元热分析的过程中做如下假定:①构件内无热源;②假定混凝土材料、CFRP 材料和保护材料为各向同性材料;③忽略钢筋对温度场的影响。高温中混凝土材料、防火保护材料和 CFRP 材料的热工性能按照参考文献[18]中表达式选用,升温曲线选用 ISO 834 标准火灾升温曲线。混凝土、CFRP 以及防火材料保护层均采用 2 维 4 节点的 DC2D4 传热四边形单元。钢筋采用可进行热分析的 2 节点杆单元 DC1D2。

本节按照上述方法对文献[19]中试件 B2-1 的试验工况建立有限元数值模型,进行截面温度场传热模拟分析,结果如图 1、图 2 所示。通过对模拟与试验结果的对比看出,上述建模方法具备良好的拟合精度,证明了本文所用模拟方法的准确性和合理性。

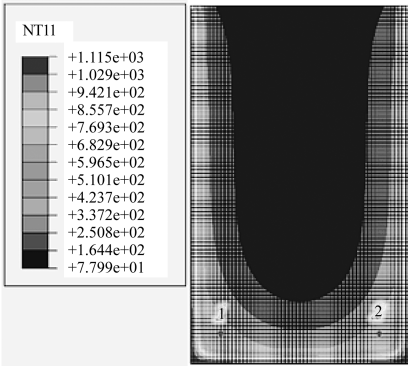


图 1 截面温度场分布图

Fig. 1 Section temperature field distribution

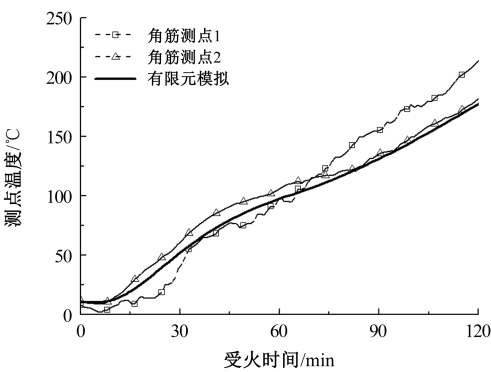


图 2 试验与模拟数据对比

Fig. 2 Comparison of test and predicted data

2.2 单面受火下温度计算方法的建立

一般情况下,CFRP 加固 RC 梁的外部采用防火保护涂层进行隔热保护,涂层参数对截面温度场影响很大。因此,首先进行含保护涂层的单面传热参数化分析,分析考虑主要因素保护材料导热系数 λ_{co} 、保护材料厚度 h_{co} 、受火时间 t_{fire} 和计算点到受火方向混凝土梁边的距离 d 的影响。分析中各参数变化值如表 1 所示。同时,根据标准《建筑设计防火规范》^[20]可知,建筑物梁柱构件的耐火极限一般分为 0.5 h、1.0 h、1.5 h、2.0 h、2.5 h 和 3.0 h 六个层次,本节采用与上述相同的六个受火时间作为计算点,对模拟得到的各时刻截面温度场数据进行拟合,得出合理可靠的温度计算公式。

表 1 主要参数变化范围

Tabel 1 Changing range of parameters

变化参数	变化范围
保护材料厚度 h_{co}/mm	0、10、20、30、40、50、70
保护材料导热 $\lambda_{co}/W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	0.06、0.08、0.10、0.12、0.14
受火时间 t_{fire}/h	0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0
计算点至受火方向混凝土梁边距离 d/mm	0、20、40、60、80、100、150、200

2.2.1 混凝土梁外部温度计算

首先,火场环境与构件表面存在热对流和热辐射,在进行大量参数分析的基础上,可拟合确定防火涂层表面温度的计算公式。数值分析发现,同一时刻下防火涂层表面温度值与 ISO 834 标准火灾曲线的数值的差值可用 $220/t_{fire} + 10$ 近似计算。图 3 给出了热分析中这一差值与公式 $y = 220/x + 10$ 的对比。结合标准火灾升温曲线,可给出任意时刻防火

保护材料表面温度 (T_{co}) 计算公式为:

$$T_{co} - T_{ini} = 345 \log_{10}(8t_{fire} + 1) - \frac{220}{t_{fire}} - 10 \quad (1)$$

式中 T_{ini} 为环境初始温度。

为建立混凝土梁表面温度的计算公式,在数值模拟计算后,选取分析中与《建筑设计防火规范》^[20]中六种受火时间对应的温度值进行数据处理。图 4 给出了不同受火时间后混凝土梁表面温度值随保护材料厚度的变化关系,图中所示曲线为各时刻数据扣除初始温度后与 $h_{co}=0$ 时数据相除作归一化处理所得。按照相同处理方法,图 5 给出了不同受火时间后混凝土梁表面温度值随保护材料导热系数的变化关系,此处的归一化处理以 $\lambda_{co}=0.12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 的数据为基准。根据图 4 和图 5 可知:在每个时刻的混凝土表面温度随保护材料厚度增加而下降,且下降趋势一致;每个时刻的混凝土表面温度随导热系数增加呈近似线性的上升。

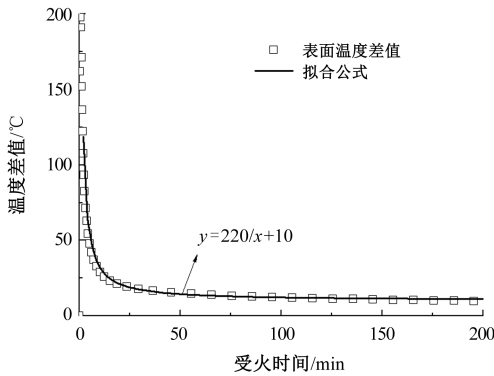


图 3 防火材料表面温度变化

Fig. 3 Temperature variation of coating surface

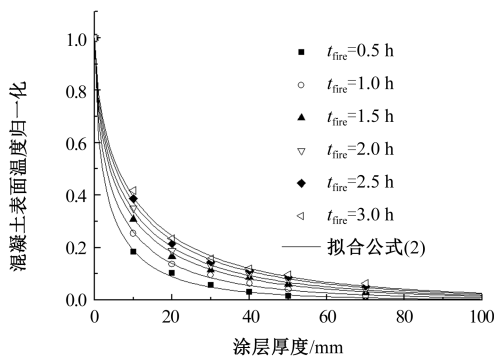


图 4 梁表面温度随 h_{co} 变化

Fig. 4 Beam surface temperature variation with h_{co}

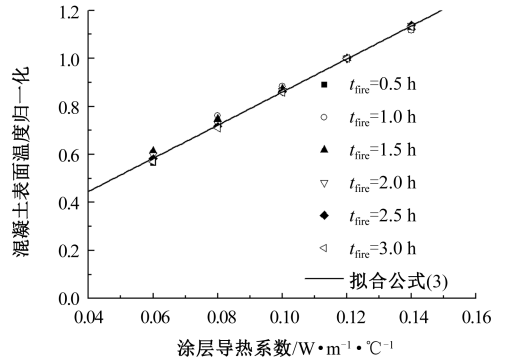


图 5 梁表面温度随 λ_{co} 变化

Fig. 5 Beam surface temperature variation with λ_{co}

借鉴集总参数法求解零维非稳态导热的温度场计算式的表达形式,对不同厚度保护材料保护下,在六个给定时刻的混凝土梁表面温升 $\Delta T_0'$ 可以用式 (2) 计算。同时,考虑保护材料导热系数变化的混凝土梁表面的温度 T_0 可用式 (3) 计算:

$$\ln\left(\frac{\Delta T_0'}{\Delta T_{co}}\right) = k_1 \cdot h_{co}^{k_2} \quad (2)$$

$$T_0 = k_3 (\Delta T_0' + T_{ini}) \quad (3)$$

$$k_1 = 0.358 \tanh(0.6423 t_{fire}) - 0.5886 \quad (4)$$

$$k_2 = 0.05 t_{fire} + 0.53 \quad (5)$$

$$k_3 = 6.9 \lambda_{co} + 0.17 \quad (6)$$

式中: ΔT_{co} 为给定时刻防火保护材料表面的温升, $^\circ\text{C}$; k_1 、 k_2 为拟合确定的与受火时间相关的系数; k_3 为拟合确定的与保护材料导热系数相关的系数。公式 (2) 和公式 (3) 与数据的吻合情况如图 4、图 5 所示。

2.2.2 混凝土梁内部温度计算

以混凝土表面温升为基准,对内部各位置的温升数据做归一化处理,如图 6 所示。借鉴式 (2) 的形式,混凝土梁内部点在某一时刻的温升 ΔT_d 可按式 (7) 计算:

$$\ln\left(\frac{\Delta T_d}{\Delta T_0}\right) = k_4 \cdot d \quad (7)$$

$$\Delta T_0 = T_0 - T_{ini} \quad (8)$$

$$k_4 = 0.0443 \tanh(1.0152 t_{fire}) - 0.0586 \quad (9)$$

式中: ΔT_0 为经导热修正后给定时刻混凝土梁表面的温升, $^\circ\text{C}$; k_4 为拟合确定的与受火时间相关的参数。公式与数据的吻合情况如图 6 所示。

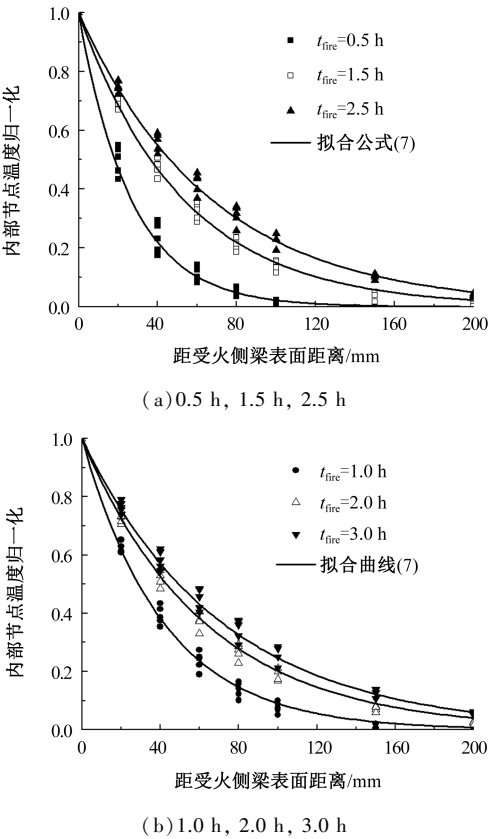


图 6 距表面不同距离各点的温度随时间变化曲线
Fig. 6 Internal temperature versus time curve
at distances from surface

当求得混凝土梁内部某点的温升 ΔT_d 后,可通过下式获得此点的计算温度值:

$$T_d = \Delta T_d + T_{ini}$$

(10)

2.3 三面受火情况下梁截面温度计算

在实际工程中,有防火保护的 CFRP 加固 RC 梁大多处于三面受火状态,本节再次进行了大量有保护的 CFRP 加固 RC 梁的三面受火温度场有限元数值模拟计算,模型尺寸及材料性能仍均与文献[19]中试验工况相同。试算发现,忽略梁侧面和底面传热效率,单独计算各个受火面的影响,然后进行线性叠加即可获得较好的效果。因此,可采用下式作为三面受火情况下梁内部温度简化计算公式:

$$T_d = \Delta T_{d,1} + \Delta T_{d,2} + \Delta T_{d,3} + T_{ini}$$

(11)

式中: $\Delta T_{d,1}$ 、 $\Delta T_{d,2}$ 、 $\Delta T_{d,3}$ 分别为三个受火面单独计算得到的混凝土梁内部点在给定时刻的温升,℃。

图 7 和表 2 给出了温度场简化计算公式(7)、公式(11)计算值与模拟值的对比。通过对比发现,公式的计算值与模拟值具备良好的相关性,其中式(11)在高温度区段计算值略微偏高,误差在 10%左右,证明了温度场简化计算式的准确性。同时,利用计算公式与文献[19]中试件 B2-1 各位置温度平均值再次进行对比,比值大多在 0.884~1.254,个别中部钢筋温度计算值与试验值之比在 1.5 左右,实际差值在 70 ℃左右,对于后期考虑退化的材料性能计算影响不大。

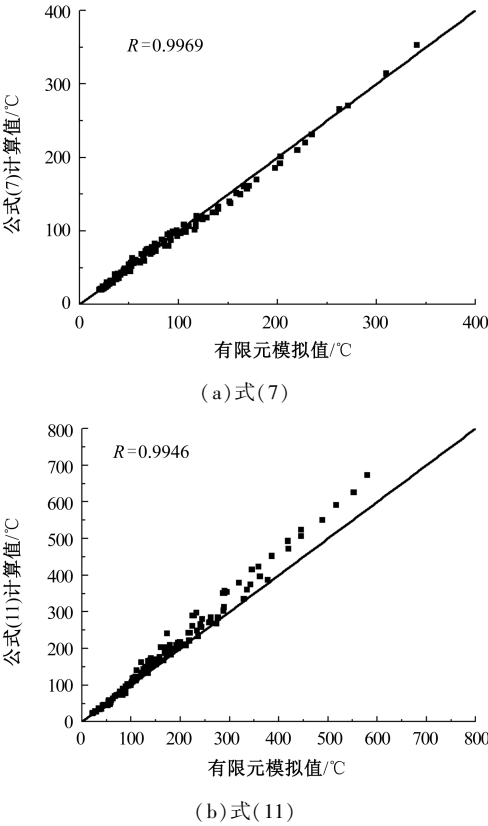


图 7 公式(7)、公式(11)计算值与模拟值对比
Fig. 7 Comparison of the internal temperature
formula and FE model

表 2 温度场计算公式与试验测试值对比
Table 2 Comparison between formula and test values

位 置	受火 0.5 h 温度/℃			受火 1.0 h 温度/℃			受火 1.5 h 温度/℃			受火 2.0 h 温度/℃			受火 2.5 h 温度/℃			受火 3.0 h 温度/℃		
	试 验	计 算	计算/ 试验	试 验	计 算	计算/ 试验	试 验	计 算	计算/ 试验	试 验	计 算	计算/ 试验	试 验	计 算	计算/ 试验	试 验	计 算	计算/ 试验
混凝土表面	105.1	92.8	0.884	160.5	159.2	0.991	207.0	228.2	1.102	256.5	281.0	1.096	296.1	333.2	1.125	358.2	376.4	1.050
角部钢筋	52.4	51.3	0.979	106.3	117.8	1.111	155.0	187.5	1.210	214.2	233.8	1.093	236.0	293.5	1.244	296.3	336.1	1.134
中部钢筋	29.2	36.8	1.260	75.1	81.1	1.080	99.5	124.8	1.254	114.4	183.9	1.520	154.3	225.2	1.459	213.0	263.0	1.188

3 火灾下 CFRP 加固 RC 梁高温抗弯承载力计算方法

当求得截面各点的温度后,即可根据材料高温力学模型计算混凝土、钢筋、CFRP 材料在高温下的材料强度,借鉴常温下的承载力极限状态设计方法计算构件的高温抗弯承载力。

3.1 计算假定

在火灾高温作用下,为简化分析,受弯构件的截

面应力分布情况用等效矩形应力图形来代替非线性的应力图形,如图 8 所示。钢筋、混凝土及 CFRP 的强度则根据当前温度进行相应修正。计算时作如下假定:①高温下截面变形符合平截面假定;②不考虑受压钢筋的作用;③忽略混凝土的高温抗拉强度;④采用受压区混凝土抗火等效截面,等效截面简化计算方法采用 Eurocode 规范^[21];⑤受弯构件具有足够的抗剪能力。

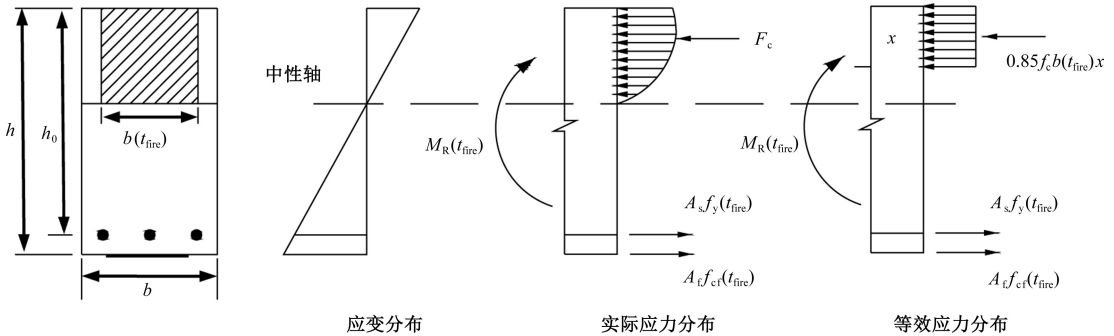


图 8 截面的应变分布和等效矩形应力分布图

Fig. 8 Strain distribution and equivalent rectangular stress distribution of section

3.2 控制截面平衡方程

对于等效应力系数 α ,按 ACI318—2004^[2] 中常温数值取用,即 $\alpha=0.85$ 。

根据等效的截面应力分布情况,建立受火时刻 t_{fire} 下控制截面的平衡方程为:

$$A_s f_{y,T} + A_f f_{cf,T} = 0.85 f_{c,T} b_T x \quad (12)$$

$$M_{R,T} = A_s f_{y,T} (h_0 - x/2) + A_f f_{cf,T} (h - x/2) \quad (13)$$

式中: A_s 、 A_f 为受拉钢筋、受拉 CFRP 的截面面积; $f_{y,T}$ 、 $f_{cf,T}$ 为 t_{fire} 时刻钢筋、CFRP 的计算强度; $f_{c,T}$ 为混凝土的高温抗压强度; b_T 为 t_{fire} 时刻受压区混凝土等效截面宽度; x 为受压区混凝土等效高度; $M_{R,T}$ 为 t_{fire} 时刻截面极限抗弯承载力; h_0 、 h 为截面有效高度和实际高度。

3.3 高温抗弯承载力计算方法

根据上述分析,CFRP 加固 RC 梁的高温抗弯承载力计算主要步骤为:保护材料选用、温度场计算、材料高温性能计算、高温抗弯承载力计算以及最后与外部荷载的对比验算。高温抗弯承载力计算过程中,材料的常温强度采用标准值。现将该计算方法总结如下:

(1) 保护材料选用及温度计算

在温度计算前,首先选用合适的防火保护材料,确定保护材料导热系数,预估保护材料厚度。按照

防火规范选定耐火极限,确定受火时间,即可进行截面温度场的计算。

(2) 材料高温性能计算

对于钢筋的计算强度 $f_{y,T}$,根据本文建立的截面温度场计算方法得到 t_{fire} 时刻钢筋所在位置的温度值,然后根据过镇海模型^[18]求得 $f_{y,T}$,如式(14)所示。

$$\frac{f_{y,T}}{f_y} = \frac{1}{24 (T/1000)^{4.5} + 1} \quad (14)$$

对于 CFRP 材料的计算强度 $f_{cf,T}$,可采用 CFRP-混凝土粘结界面高温极限承载力除以 CFRP 截面面积代替,即 $f_{cf,T} = P_{\text{max},L}^T / A_f$ 。 $P_{\text{max},L}^T$ 为粘结长度为 L 的粘结界面高温极限承载力,可根据文献[22,23]中温度作用下 CFRP-混凝土的界面极限承载力理论模型,通过式(15)~式(17)计算求得。当温度过高时,粘贴用胶黏剂分解,粘结完全失效,因此当粘贴界面温度超过玻璃化温度(T_g) 60℃以上时, $P_{\text{max},L}^T$ 可直接取为 0。

$$P_{\text{max},L}^T = a P_{\text{max},\infty}^T \quad (15)$$

$$\frac{P_{\text{max},\infty}^T}{E_f b_f t_f A} = 0.285 \times \tanh[-0.12 \times (T - T_g) + 0.55] + 0.715 \quad (16)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1.761 \cdot \tanh(0.142ABL) & ABL \leq 2 \\ \tanh(0.332ABL - 0.132) & ABL > 2 \end{cases} \quad (17)$$

式中: T 为粘贴界面温度; $P_{\max,\infty}^T$ 为粘结长度“无限”时在给定时刻的界面极限承载力,与界面温度相关; E_f 、 b_f 、 t_f 分别为 CFRP 材料的弹性模量、宽度和厚度; A 、 B 为界面材料固有参数,可通过界面剪切试验获得或由文献[24]中的经验公式计算求得。

对于受压区混凝土强度 f_c 采用了欧洲规范建议式,始终采用常温值:

$$f_{c,T} = \begin{cases} f_c & T \leq 500\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0 & T > 500\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (18)$$

同时,对于受压区等效宽度 b_T 亦取温度小于 500 $^{\circ}\text{C}$ 的部分截面宽度^[21]。

(3) 高温抗弯承载力计算

借鉴常温截面承载力极限状态设计方法,可按照式(12)、式(13)计算高温抗弯承载力 $M_{R,T}$ 。

(4) 对比验算

根据外部荷载计算最不利截面的弯矩值 $M_{S,T}$,若 $M_{S,T} \leq M_{R,T}$,即荷载小于抗力,所选保护材料满足要求(厚度和导热系数);若 $M_{S,T} > M_{R,T}$,即荷载大于抗力,说明所选保护材料不满足要求,需增加厚度或更换导热系数更小的材料。

综上所述,本文给出的高温抗弯承载力计算方法只需明确受火时间及防火保护材料的参数,即可求得各位置温度,进而通过计算各材料的高温性能后求得构件的高温抗弯承载力,可大大简化计算过程。根据本文中有限元数值模型的条件和范围,本文所提出的公式及设计方法适用范围为:

(1) ISO 834 标准火灾下有防火保护的 CFRP 抗弯加固 RC 梁;

- (2) 保护材料导热系数为 0.06 W/($\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$) ~ 0.14 W/($\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$),厚度为 10 mm ~ 70 mm;
- (3) 混凝土含水率在 3% 左右,混凝土热工系数大体满足欧洲规范建议值。

4 算例分析

为了检验防火设计方法的可行性,以三面受火梁为算例,按本文设计方法验算高温抗弯承载力并确定防火涂层厚度。

假定 CFRP 加固 RC 梁的主要参数为:截面尺寸为 250 mm×600 mm,跨度为 5.2 m,两端支座为简支;混凝土强度等级为 C30,轴心抗压强度标准值 $f_c = 20.1\text{ MPa}$;受拉钢筋为 3 根直径为 20 mm 的带肋钢筋,屈服强度标准值为 360 MPa;受拉钢筋到梁底距离为 35 mm,到梁边距离分别为 35 mm、125 mm 和 215 mm;CFRP 宽度为 200 mm,厚度为 0.334 mm,弹模为 240 GPa;界面参数根据文献[24]给出的建议取 $A = 0.0051$, $B = 10.4$,胶黏剂玻璃化温度为 53 $^{\circ}\text{C}$;试件全长选用厚型涂料保护,导热系数为 0.12 W/ $\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$,三面受火。常温下混凝土梁最大弯矩承载力标准值为 179 kN·m,加固后极限弯矩承载力标准值为 257 kN·m。

当荷载引起的混凝土梁跨中最大弯矩为 185 kN·m 时,耐火等级要求为一级(2.0 h)。试求所需防火保护材料厚度和保护后火灾 2.0 h 时的高温抗弯承载力。

第一步,以预估防火保护材料厚度 $h_{co} = 20\text{ mm}$ 进行各位置点温度计算,各位置火灾 2.0 h 后温度值见表 3。

表 3 20 mm(50 mm)厚涂料保护下各点温度计算

Table 3 Temperature calculation of points under the 20 (50) mm coating

位 置	梁底(界面)中心	角部钢筋	中部钢筋	上部 1/3 高度位置 ($d=0$)	上部 1/3 高度位置 ($d=20$)	上部 2/3 高度位置 ($d=0$)
温升计算式	$\Delta T_0 + \Delta T_{125} + \Delta T_{125}$	$\Delta T_{35} + \Delta T_{35} + \Delta T_{215}$	$\Delta T_{35} + \Delta T_{125} + \Delta T_{125}$	$\Delta T_{300} + \Delta T_0 + \Delta T_{250}$	$\Delta T_{300} + \Delta T_{20} + \Delta T_{230}$	$\Delta T_{150} + \Delta T_0 + \Delta T_{250}$
温度值/ $^{\circ}\text{C}$	281.1(107.2)	261.4(100.6)	193.0(77.8)	231.0(90.4)	176.1(72.1)	247.9(96.1)

第二步,计算材料高温性能。角部钢筋温度为 261.4 $^{\circ}\text{C}$,计算得 $f_{y,T} = 340.6\text{ MPa}$;中部钢筋温度为 193 $^{\circ}\text{C}$,计算得 $f_{y,T} = 355.0\text{ MPa}$;上部受压区混凝土温度均低于 500 $^{\circ}\text{C}$,故取 $b_T = 250\text{ mm}$;CFRP-混凝土界面温度为 281.1 $^{\circ}\text{C}$,远远超过 $T_g + 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,取 $f_{cf,T} = 0$ 。

第三步,代入公式(12)中,求得受压区混凝土等效高度 $x = 76.2\text{ mm}$,将 x 代入式(13)中求得构件在受火 2.0 h 后极限承载力 $M_R(t_{fire}) = 171.4\text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

第四步,与最不利弯矩进行对比, $M_{S,T} = 185 > M_{R,T} = 171.4$,不满足要求。因此,需要增加保护层厚度。

选用 50 mm 厚防火保护涂层,再次按照上述步骤计算各点温度(见表 3 括号内数值)。根据式(14)计算得 $f_{y,T} = 360\text{ MPa}$;上部受压区混凝土宽度 $b_T = 250\text{ mm}$;此时,CFRP-混凝土界面温度为 107.2 $^{\circ}\text{C}$,根据式(15)~式(17)求得 $f_{cf,T} = 526.3\text{ MPa}$ 。

再次计算截面承载力,代入公式(12)中,求得受压区混凝土等效高度 $x = 87.6 \text{ mm}$,将 x 代入式(13)中求得构件在受火 2.0 h 后极限承载力 $M_{R,T} = 195.1 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。经对比, $M_{S,T} = 185 < M_{R,T} = 195.1$,满足要求。

所以,本例中计算受火 2 h 后高温抗弯承载力为 $195.1 \text{ kN}\cdot\text{m}$,选用 50 mm 厚度的厚型涂料保护可以满足一级耐火极限。

5 结 论

(1)建立了单面受火情况下的梁内部和外部温度的计算方法;通过叠加,得到了有防火保护的三面受火梁截面温度的计算公式,并与试验和有限元结果对比验证了计算公式的准确性;

(2)根据材料性能高温退化模型,建立了 CFRP 加固混凝土梁构件在标准火灾升温曲线下给定时刻的高温抗弯承载力计算方法,以及保护材料厚度的选择方法;

(3)本文建立的 CFRP 加固混凝土梁截面温度场计算公式和火灾下梁的高温抗弯承载力计算公式,能够很好地替代有限元计算方法,避免了复杂的温度场计算,提高了计算效率且具有较好的计算精度,使得有耐火极限要求的构件可以按照常温下的梁截面极限状态计算方法来设计和校核,可为构件的防火设计提供很大便利。

参考文献

- [1] Feng P, Ye L, Bao R. A large-span woven web suspension roof system made of high-strength FRP[J]. Iabse Symposium Report, 2000, 88(3): 43-48.
- [2] Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures; ACI440[S]. American Concrete Institute, 2004.
- [3] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
- [4] 陆锦标, 顾祥林. 既有建筑结构检测鉴定规范的现状和发展趋势[J]. 住宅科技, 2008(6): 37-43.
- [5] Halliwell S. In-service performance of glass reinforced plastic composites in buildings[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 2004, 157(1): 99-104.
- [6] 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范: GB 50608—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- [7] Abbasi A, Hogg P J. A model for predicting the properties of the constituents of a glass fibre rebar reinforced concrete beam at elevated temperatures simulating a fire test[J]. Composites Part B: Engineering, 2005, 36(5): 384-393.
- [8] 董坤, 胡克旭, 王炜浩, 等. CFRP 加固混凝土梁不同防火材料保护设计方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(1): 6-10.
- [9] Gao W Y, Dai J G, Teng J G. Simple method for predicting temperatures in reinforced concrete beams exposed to a standard fire[J]. Advances in Structural Engineering, 2014, 17: 573-589.
- [10] 刘汾涛, 魏德敏. 碳纤维布加固混凝土梁的温度场实用计算方法[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(6): 93-98.
- [11] 吴波, 万志军, 王帆. 碳纤维布抗弯加固钢筋混凝土梁的耐火极限分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2008(2): 101-108.
- [12] 刘汾涛, 吴波, 魏德敏. 碳纤维布加固混凝土梁的高温抗弯承载力——影响因素及衰减关系[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(6): 21-28.
- [13] Kodur V K R, Yu B. Rational approach for evaluating fire resistance of FRP-strengthened concrete beams[J]. J Comp Cons, 2016, 20(6): 4016041.
- [14] Kodur V K R, Yu B. A simplified approach for predicting temperature in reinforced concrete members exposed to standard fire[J]. Fire Safety Journal, 2013, 56(1): 39-51.
- [15] Chowdhury E, Bisby L, Green M, et al. Heat transfer and structural response modelling of FRP confined rectangular concrete columns in fire[J]. Construction & Building Materials, 2012, 32(7): 77-89.
- [16] Kodur V K, Ahemd A, Dwaikat M. Modeling the fire performance of FRP-strengthened reinforced concrete beams: state-of-the-art[J]. Composites & Polymers, 2009, 1-20.
- [17] Gao W Y, Dai J G, Teng J G. Fire resistance design of unprotected FRP-strengthened RC beams[J]. Materials and Structures, 2016, 49(12): 5357-5371.
- [18] 高皖扬, 胡克旭, 陆洲导. CFRP 加固钢筋混凝土梁耐火性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 15-23.
- [19] 胡克旭, 侯梦君, 高皖扬, 等. 不同保护措施下 CFRP 加固混凝土梁耐火性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(6): 138-144.
- [20] 建筑设计防火规范: GB50016—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [21] Design of Concrete Structures, Part 1-2; General rules-Structural Fire Design; EN 1992-1-2, Eurocode 2[S]. European Committee for Standardization, 2004.
- [22] Dong K, Hu K. Development of bond strength model for CFRP-to-concrete joints at high temperatures[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 95: 264-271.
- [23] 胡克旭, 董坤, 杨耀武. 温度作用对碳纤维—混凝土界面黏结性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 845-852.
- [24] Dai J G, Ueda T, Sato Y. Development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method[J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(1): 52-62.

SIMPLIFIED CALCULATION METHOD FOR HIGH TEMPERATURE FLEXURAL BEARING CAPACITY OF RC BEAMS STRENGTHENED WITH CFRP UNDER FIRE

HAO Jian-wen¹, DONG Kun^{1*}, JIANG Ji-tong¹, HU Ke-xu²

(1. College of Engineering, Ocean University of Technology, Qingdao 266100, China;
2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The calculation of bearing capacity of CFRP reinforced members under fire condition is the key to the fire resistance design. The temperature field of one-surface and three-surface exposed to fire of insulated CFRP reinforced RC beams under standard fire was analyzed by the finite element numerical simulation. Considering the influence of main factors (thickness and thermal conductivity of fireproof coating), a simplified formula for calculating the surface and internal temperatures of strengthened members is proposed. The accuracy of the simplified formula was well verified by comparing with the experimental data. By combining the analysis method of ultimate state of concrete beams section and the high temperature degradation model of material and interface properties, a simplified calculation method was established to calculate the high temperature bearing capacity of CFRP reinforced RC beams at different times under ISO 834 standard fire conditions. Compared the load capacity with the load effect, the reasonable thickness of fire protection materials could be determined. The research results can be helpful to establish the fire protection design method of CFRP reinforced RC beams, or to judge whether the existing CFRP reinforced beams can meet the requirement of fire resistance. The theoretical means and methods for fire resistance design and safety appraisal of CFRP reinforced structures were proposed.

Key words: concrete structure; FRP strengthening; loading capacity; fire; calculation method; composites

(上接第 9 页)

EXPERIMENTAL RESEARCH ON ACOUSTIC EMISSION SOURCE LOCALIZATION FOR CARBON FIBER COMPOSITE

QI Tian-tian¹, CHEN Yao¹, HE Cai-hou^{1,2}, LI Qiu-feng^{1*}

(1. Key Laboratory of NDT (Nanchang Hangkong University), Ministry of Education, Nanchang 330063, China;
2. Yingtian Branch of Special Equipment Inspection and Research Institute of Jiangxi, Yingtian 335000, China)

Abstract: Acoustic Emission (AE) testing technology can realize the dynamic monitoring of materials, and it also has certain limitations. Because the AE signal is more complicated in the anisotropic carbon fiber composite material, the AE source damage location has a large deviation. A time reversal focusing and enhancing algorithm is used for the AE positioning requirements of carbon fiber composite plate. Firstly, according to the basic theory of time reversal, the signal enhancement processing equation is derived, and the focus time of the AE source can be calculated, furthermore enhancing the focus amplitude of the AE source signal field and the signal to noise ratio (SNR) is improved. Then the wave image is reconstructed in the detection area, and the AE source is accurately positioned by the focus signal. Finally, the method has been verified through experiment, and the results show that the localization algorithm can locate the AE source of complex anisotropic materials, and the positioning accuracy is greatly improved compared with the conventional instrument positioning method.

Key words: acoustic emission (AE) testing; carbon fiber composite; source location; focusing time; signal noise ratio (SNR)