

植筋连接混凝土梁耐火极限计算方法^{*}

陆洲导¹, 苏诗雅¹, 余江滔^{1,2†}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市工程结构安全重点实验室, 上海 200032)

摘要:为定量评估火灾情况下的耐火极限,提出了高温下植筋连接混凝土梁耐火极限预测方法.采用等效截面法,考虑混凝土和钢筋强度在高温下的弱化,对截面进行强度折减,等效为阶梯形截面,结合常温下构件力学性能的简化计算理论及火灾中单根植筋的极限承载力计算公式,提出火灾中植筋混凝土梁耐火极限的计算方法,并与试验值进行对比分析.结果表明,本文公式计算出的植筋构件耐火极限与试验结果能较好地吻合,计算值与试验值的误差都在15%左右,差值一般都在15 min以内,可以用该方法进行植筋连接混凝土梁的耐火极限计算.

关键词:耐火极限;植筋;高温;等效截面法

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Prediction Method on Fire Endurance of Post Installed Rebar Beams

LU Zhoudao¹, SU Shiya¹, YU Jiangtao^{1,2†}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, Shanghai 200032, China)

Abstract: For quantitative evaluation of fire endurance, this paper presented a prediction method on the fire endurance of post installed rebar beams exposed to elevated temperature. It was based on equivalent section method, which regarded initial sections as ladder sections by strength reduction of concrete and reinforcement under high temperature. The simplified calculation theory about the mechanical properties of members at ambient temperature and the calculation formula of the ultimate strength of single anchored rebar in fire were used. The feasibility of the theoretical calculation was evaluated through a comparison between the results obtained by the prediction method and the experimental measurements. The results showed that the fire endurance calculated by formula agreed well with the test data with the error of 15%, equivalent to about 15 mins. It was feasible to use this method to predict the fire endurance.

Key words: fire endurance; bonded rebar; high temperature; equivalent section method

植筋连接(Post installed rebar connections, PIRC)技术在混凝土结构加固改造工程中应用广

泛.其力学性能受诸多因素影响,如混凝土强度、保护层厚度、钢筋间距等.近年来,国内外学者对常温

^{*} 收稿日期:2017-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478362), National Natural Science Foundation of China(51478362);上海市工程结构安全重点实验室开放课题(2016-KF08), Open Subject of the Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety (2016-KF08)

作者简介:陆洲导(1957-),男,上海人,同济大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: yujiangtao@tongji.edu.cn

条件下植筋胶黏结滑移、植筋构件承载力以及植筋构件疲劳性能等做了大量研究^[1-5]。环氧树脂作为一种常用的植筋胶,广泛应用于植筋连接中。当温度超过玻璃化转变温度 T_g 时,环氧树脂强度显著下降,转变为软和黏性材料,转变温度一般为 $50 \sim 80$ °C,远低于钢筋和混凝土的临界温度(其强度下降到其初始值的 50%)。一般来说,混凝土在 400 °C 时强度会出现明显下降,约为常温的 80%^[6]。钢材的弱化温度则在 500 °C 左右^[7]。由此可知,植筋胶是火灾(高温)中植筋构件的主要薄弱环节。理论上,即使植筋构件的内部温度远低于钢筋的软化温度,构件也可能因为植筋胶的力学性能劣化而失效。然而,较少有学者研究温度对植筋连接性能的影响,关于高温中植筋试件的耐火极限的研究更是少之又少。德国慧鱼集团研究了不同受火时间后,不同植筋深度下单根植筋的拉拔承载力的变化,以及不同保护层下,与受火面平行的植筋搭接连接的黏结力与受火时间的关系^[8]。Kunz^[9]研究了植筋胶黏结力随温度的变化,给出了平行搭接的黏结剂承载力计算公式。郑文忠、侯晓萌等^[10-11]凝炼了混凝土及预应力混凝土结构构件的抗火性能,介绍了火灾后混凝土结构加固修复技术,指出了混凝土及预应力混凝土结构抗火研究中存在的问题,展望了其发展趋势。袁广林、闫玉红等^[12-13]进行了高温后植筋边节点的受力性能研究及火灾后植筋锚固性能研究及焊接对植筋胶性能的影响研究。刘长青、陆洲导等进行了高温下植筋构件抗火性能试验研究^[14-16],包括植筋黏结滑移性能研究、混凝土梁极限承载力、耐火极限研究等。在耐火极限试验中,研究者分析了保护层厚度和植筋深度对植筋连接混凝土梁耐火极限的影响。然而,迄今仍没有一套可用于预测高温下植筋连接混凝土梁耐火极限的简化方法。鉴于上述原因,本文在前人研究的基础上,提出高温下植筋连接混凝土梁耐火极限的简化计算方法,并将计算值与试验值进行对比分析。

1 植筋构件耐火极限的简化计算方法

1.1 高温中单根植筋的承载力

在之前的研究中,刘长青等^[15]推导了单根植筋的极限承载力理论公式:

$$P_{\max} = \min\{\alpha_c \alpha_s \alpha_e \sqrt{\tau(s, T) EA \pi d_0 \delta_1} \operatorname{th}(\lambda L), f_{yk} A\}. \quad (1)$$

式中: α_c 、 α_s 、 α_e 分别为混凝土开裂、钢筋间距、边距

对植筋承载力的影响系数,这 3 个系数需通过试验确定,具体适用范围参见相关文献^[17]; s 为钢筋滑移位移; T 为植筋胶温度; E 为钢筋弹性模量; A 为钢筋面积; d_0 为钢筋直径; L 为植筋埋置深度; f_{yk} 为钢筋屈服强度标准值。该公式适用于环氧树脂类植筋胶黏剂。不同类型、不同品牌的黏胶剂的单根植筋高温抗拉性能建议利用试验确定。

如前文所述,高温下植筋胶的黏结强度降幅远大于钢筋的强度降幅,如图 1 所示。但是在足够大的植筋深度下,植筋构件的承载力仍可能由钢筋强度控制。因此,式(1)取两种情况的较小值作为单根植筋的极限承载力。

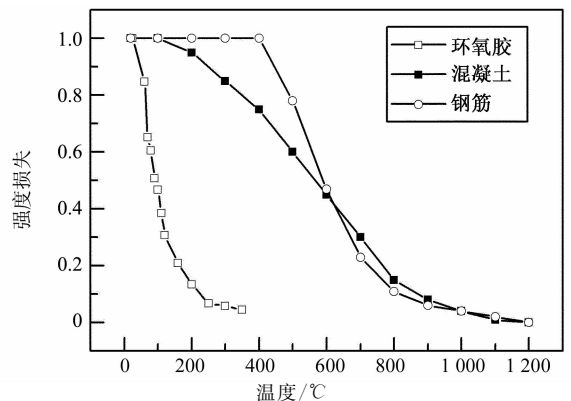


图 1 高温下植筋胶、混凝土和钢筋强度弱化曲线

Fig. 1 The normalized strength loss of epoxy adhesive, concrete and steel at elevated temperatures

1.2 植筋构件耐火极限的算法

基于高温下单根植筋黏结-滑移试验与理论研究结果,本研究提出了一种植筋受弯构件耐火极限的简化算法。算法的基本假定如下:

- 1) 截面应变为线性分布,符合平截面假定;
- 2) 考虑温度对钢筋强度的影响,如图 2 所示。

高温中钢筋的应力-应变关系曲线与常温相似;

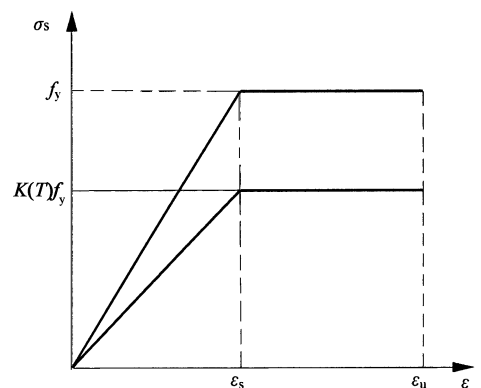


图 2 钢筋应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of steel

3)高温中混凝土的应力-应变关系曲线如图3所示,并取 $\epsilon_0 = 0.002, \epsilon_u = 0.0033$;

4)截面受拉区拉力全部由钢筋承担;

5)考虑到钢材的导热性,沿植筋深度方向的钢筋和植筋胶的温度相同.

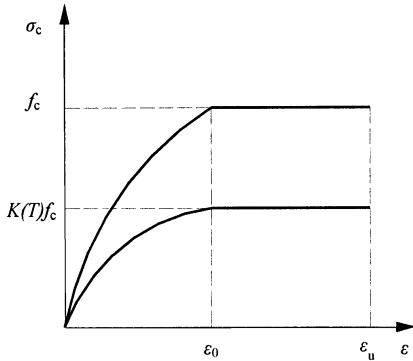


图3 混凝土应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of concrete

考虑到T型截面梁是最常见的钢筋混凝土受弯构件,实际工程中,钢筋混凝土楼板往往和梁一起浇筑,楼板作为翼缘参与工作.因此本文主要介绍T形截面计算方法.

计算中将截面分为两部分:翼缘和矩形截面.矩形截面部分可按照三面受火的矩形梁截面进行计算,翼缘部分可按照单面受火板进行计算.因此,算法主要包括两个部分,截面温度场的确定和植筋梁构件的耐火极限预测.

首先是截面温度场的确定.通过文献推荐的等温线查表法或采用数值方法^[18-20]获得三面受火梁和单面受火板的截面温度场.本文将矩形截面按 $\Delta b \times \Delta h$ 分成网格,以网格中点的温度作为该单元的平均温度,进而求出该单元的混凝土强度随温度变化的折减系数 $k_{i,j}(T)$ (i, j 为横、纵坐标上单元的编号),即可求出该单元的宽度折减系数.在宽度方向上对每一单元求和,则在不同竖标时,高度为 Δh 的混凝土条带上宽度折减系数 $K(T)_j$ 为:

$$K(T)_j = \frac{\sum_{i=1}^n k_{i,j}(T) \cdot \Delta b}{b} \quad (2)$$

通过宽度折减系数 $K(T)_j$,将截面按照合力相等,形心不变的原则,转变为宽度为 $K(T)_j b$ 、高度为 Δh 的条带组成的阶梯形截面.

对于板面的折减,参考矩形截面的折减方法,将其沿高度方向分成高度为 Δh 的均匀条带,根据板截面单面受火的温度场分布,确定各条带的混凝土强

度折减系数 $K(T)_j$,即可将板截面等效成阶梯形截面.

对于钢筋,根据温度对钢筋强度的影响,采用折减系数对受拉区和受压区钢筋强度进行折减,折减公式如式(3)所示.当钢筋(植筋胶)温度达到 T 时,折减系数分别为 $K_{si}(T)$ 和 $K'_{si}(T)$.

$$K_{si}(T)/K'_{si}(T) = \begin{cases} 1.0, & 20^\circ\text{C} \leq T_s \leq 300^\circ\text{C}; \\ 1.24 \times 10^{-8} T_s^3 - 2.096 \times 10^{-5} T_s^2 + 9.228 \times 10^{-3} T_s - 0.2168, & 300^\circ\text{C} < T_s < 800^\circ\text{C}; \\ 0.5 - T_s/2000, & 800^\circ\text{C} \leq T_s \leq 1000^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (3)$$

因此,T形梁截面划分如图4所示,等效后截面如图5所示,仍为T形截面.考虑钢筋(植筋胶)强度折减后,参考常温计算公式求抵抗弯矩.

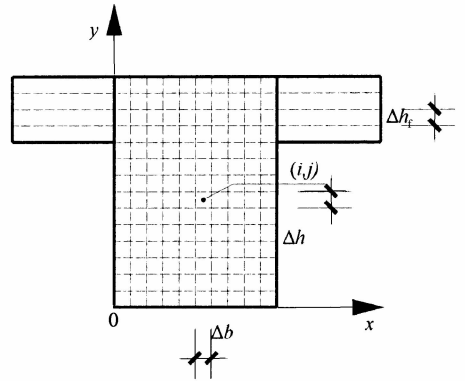


图4 T形截面单元划分

Fig. 4 The mesh discretization of T-shaped beam

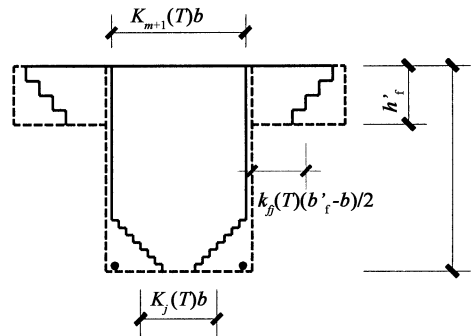


图5 火灾中T形截面有效截面

Fig. 5 Effective area of T-shaped section under high temperature

1.2.1 火灾(高温)中受压区受火截面简化计算公式

对于翼缘位于受拉区的T形截面,火灾(高温)中其正截面的受弯承载力简化计算公式与矩形截面相同.

受压区为阶梯形,由于 $K(T)_j$ 值随竖标变化,假设受压区高度为 $x = m \cdot \Delta h + x_1$,受压区由两部分组成,一为 m 阶阶梯形,一为高 x_1 、宽 $K_{m+1}(T)b$ 的矩形。

$$\alpha_1 f_c \sum_{j=1}^m K_j(T) b \Delta h + \alpha_1 f_c K_{m+1}(T) b x_1 + K'_{si}(T) f'_y A'_{si} = K_{si}(T) f_y A_{si}. \quad (4)$$

$$M_{uT} = \alpha_1 f_c \sum_{j=1}^m K_j(T) b \cdot \Delta h (h_0 - c) + \alpha_1 f_c K_{m+1}(T) b x_1 \cdot (h_0 - m \cdot \Delta h - \frac{x_1}{2}) + K'_{si}(T) f'_y A'_{si} (h_0 - a'_s). \quad (5)$$

式中: M_{uT} 为高温中梁截面抵抗力矩; α_1 为混凝土强度系数; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; b 为截面有效宽度; f_y 、 f'_y 分别为受拉钢筋和受压钢筋抗拉强度设计值; h_0 为跨中截面有效高度; a'_s 为纵向受压钢筋合力作用点到受压区边缘的距离; C 为阶梯形受压区形心到受火边的距离; c_j 为第 j 个条带形心到受火边的距离; 其他各符号含义同前。

$$c = \frac{\sum_{j=1}^m K_j(T) b \cdot \Delta h c_j}{\sum_{j=1}^m K_j(T) b \cdot \Delta h} = \frac{\sum_{j=1}^m K_j(T) c_j}{\sum_{j=1}^m K_j(T)}. \quad (6)$$

1.2.2 火灾(高温)中受拉区受火截面简化计算公式

对于翼缘位于受压区的截面,按中和轴的位置不同,可以将 T 形截面分为两种类型:1) 当中和轴位于受压翼缘内时,为第一类 T 形截面;2) 当中和轴位于腹板内时,为第二类 T 形截面. 当满足下列条件之一时,可按第一类 T 形截面计算,否则按第二类 T 形截面计算。

$$\alpha_1 f_c \left[\sum_{fj=1}^{m_f} K_{fj}(T) (b'_f - b) + (b_{m+1} + 2 \sum_{j=1}^m K_j(T) \cdot \Delta b) \right] h'_f \geq K_{si}(T) f_y A_{si}; \quad (7)$$

$$M_d \leq M_{uT} = \alpha_1 f_c \left[\sum_{fj=1}^{m_f} K_{fj}(T) (b'_f - b) + (b_{m+1} + \sum_{j=1}^m K_j \cdot \Delta b) \right] h'_f (h_0 - 0.5 h'_f). \quad (8)$$

式中: M_d 为截面设计弯矩; $K_{fj}(T)$ 为火灾(高温)中翼缘宽度折减系数; m_j 为火灾(高温)中翼缘内条带层数; b'_f 、 h'_f 分别为翼缘的宽度和高度,其他各符号含义同前. 第一类 T 形截面受弯构件的正截面受弯承载力简化计算公式为:

$$K_{si}(T) f_y A_{si} = \alpha_1 f_c x \cdot \left[\sum_{fj=1}^{m_f} K_{fj}(T) (b'_f - b) + \right.$$

$$\left. (b_{m+1} + \sum_{j=1}^m K_j(T) \cdot \Delta b) \right]. \quad (9)$$

$$M_{uT} = \alpha_1 f_c x (h_0 - 0.5x) \cdot \left[\sum_{fj=1}^{m_f} K_{fj}(T) (b'_f - b) + (b_{m+1} + 2 \sum_{j=1}^m K_j(T) \cdot \Delta b) \right]. \quad (10)$$

第二类 T 形截面的受弯承载力可分解为两部分:1) 腹板受压区混凝土和相应的受拉钢筋贡献的承载力 M_{u1T} ;2) 受压翼缘混凝土和相应的受拉钢筋贡献的承载力 M'_{uT} . 其简化计算公式为:

$$\alpha_1 f_c (b_{m+1} + \sum_{j=1}^m K_j(T) \cdot \Delta b) x + \alpha_1 f_c \sum_{fj=1}^{m_f} K_{fj}(T) (b'_f - b) h'_f = K_{si}(T) f_y A_{si}. \quad (11)$$

$$M_u = M_{u1T} + M'_{uT} = \alpha_1 f_c (b_{m+1} + \sum_{j=1}^m K_j(T) \cdot \Delta b) x (h_0 - 0.5x) + \alpha_1 f_c \sum_{fj=1}^{m_f} K_{fj}(T) (b'_f - b) h'_f (h_0 - 0.5 h'_f). \quad (12)$$

如已知构件的截面温度分布,可以通过以上公式计算极限承载力变化。

综上所述,植筋试件的耐火极限计算流程如下:首先,根据式(1)计算出单根植筋极限承载力随温度的变化. 然后,根据单根植筋极限承载力和混凝土的温度分布计算构件关键截面的极限承载力随温度的变化,如式(2)~(13)所示. 当植筋梁的承载力无法承受设计荷载时,认为试件达到极限状态,对应的火灾持续时间为试件的耐火极限。

2 试验验证

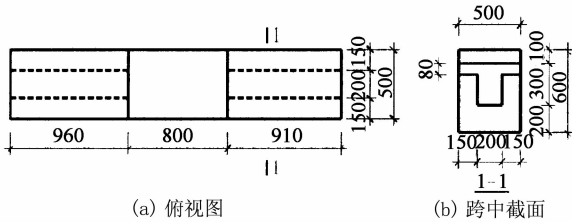
2.1 试验概况

为了对提出的算法进行验证,本研究进行了高温下植筋构件耐火极限试验. 试验共浇筑了6个植筋试件,即12个T形截面悬臂梁. 考虑了两种影响因素——保护层厚度和植筋深度,见表1. 为了方便加载,试件为双悬臂梁,尺寸如图6所示。

试件受火与加载装置如图7所示,在每个试件基材的中线对称布置2只引伸式位移计,用于测量试验过程中基材位移的变化,如图7中的B1、B2和B3、B4。

表 1 试件概况
Tab. 1 Specimen program

试件	保护层厚度/mm	植筋深度
PIRCS-25-15d	25	15d
PIRCS-25-20d	25	20d
PIRCS-40-15d	40	15d
PIRCS-40-20d	40	20d
PIRCS-60-15d	60	15d
PIRCS-60-20d	60	20d



(a) 俯视图 (b) 跨中截面

图 6 试件外观尺寸

Fig. 6 Geometry of specimens

对试件进行加载,加载点到悬臂梁根部的距离为 840 mm,待加载到设定荷载 46 kN 后,维持荷载不变. 采用 ISO834 国际标准升温曲线对植筋构件进行火灾试验,记录梁截面内温度场、植筋试件基材位移、受火时间、钢筋和植筋胶温度等.

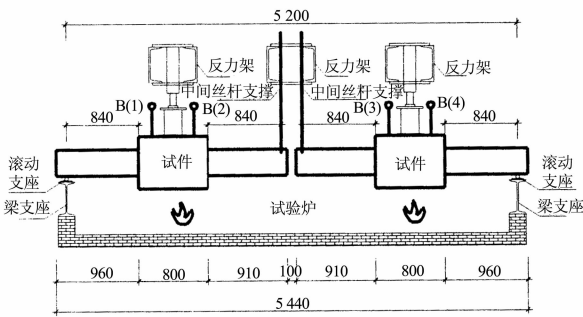


图 7 试件受火和加载示意图

Fig. 7 Heating and loading regimes in the fire test

2.2 试验结果与对比分析

2.2.1 试验结果

试验中测量了植筋梁底部植筋胶的温度,变化曲线如图 8 所示. 植筋胶温度随着受火时间的变化与钢筋温度相似. 刚开始时,温度增加缓慢,当受火时间超过 10 min 后,随着受火时间的增加,植筋温度开始非线性上升. 当受火时间到 40 min 时,升温曲线上出现一个恒温段. 经过恒温段后,温度继续上升,直至达到耐火极限.

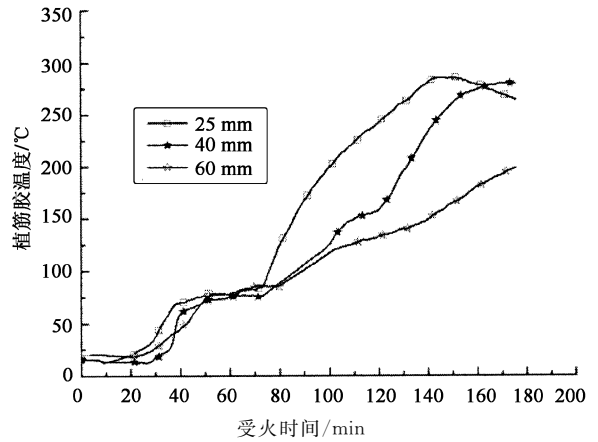


图 8 植筋胶温度变化

Fig. 8 Temperature histories of adhesive

测得的基材位移随受火时间的变化如图 9 所示. 当植筋试件基材的竖向位移达到跨度的 1/20, 即 84 mm 时^[21],认为试件达到了耐火极限. 可以看到,在刚开始的 10 min 内,基材位移基本不变. 随着热量向混凝土内部的传递,各个试件的基材位移开始出现分化. 6 个试件的耐火极限见表 2. 当试验进行到 137 min 时,60 mm 20d 试件的基材位移仍然小于指定的 84 mm,于是对该试件增加荷载直至破坏.

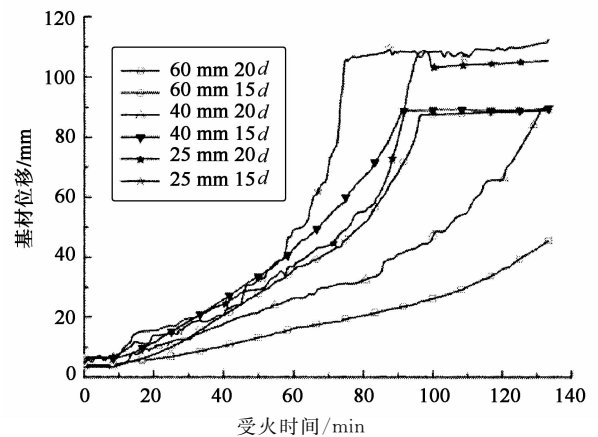


图 9 基材位移变化

Fig. 9 Substrate displacement histories

2.2.2 耐火极限对比

如前文所述,根据式(1)可计算出单根植筋极限拉力随温度的变化. 图 10 中绘制了植筋深度分别为 15d 和 20d 的单根植筋极限拉力-温度曲线. 根据式(2)~(13),通过单根植筋极限拉力和混凝土的温度分布计算构件关键截面的极限承载力,图 11 给出了截面的极限承载力与植筋胶温度的关系.

计算表明,对于同一保护层厚度的植筋试件,在未受火的情况下,试件的极限承载力相同,但随着温度的升高,植筋胶性能开始弱化,不同植筋深度构件的极限承载力降幅不同,15d 植筋试件的承载力小于 20d 植筋试件. 此外,对于相同植筋深度的植筋试件,虽然保护层的增加会减小钢筋的抗弯力臂,导致常温承载力的降低,但在高温环境下,较厚的保护层可以有效地降低植筋的升温速率,从而导致更高的耐火极限.

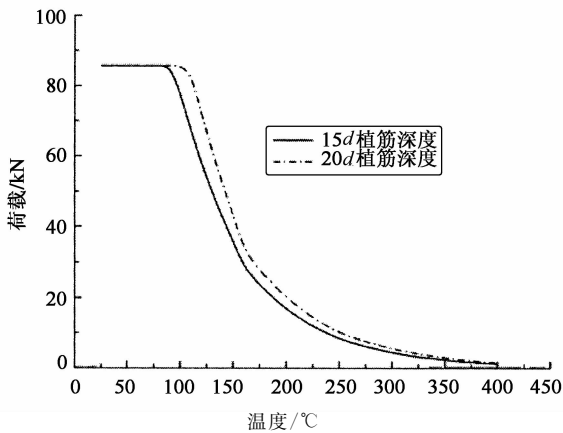


图 10 单根植筋极限拉力-温度曲线
Fig. 10 Ultimate load-temperature curves of single anchored rebar

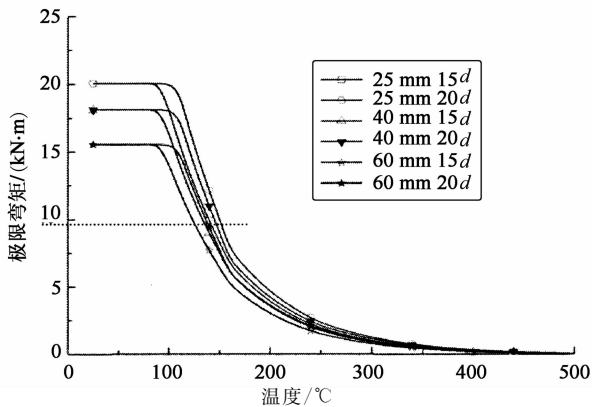


图 11 关键截面的极限承载力-植筋胶温度关系
Fig. 11 Ultimate strength-temperature curves at critical sections

图 11 中,横虚线表示试验荷载对应的关键截面弯矩. 当截面的极限承载力低于该弯矩时,可认为试件达到耐火极限. 耐火极限对应的植筋胶温度见表 2.

由表 2 可知,计算值与试验值吻合较好,除 40 mm 20d 植筋试件外,其他试件的差值一般都在 15 min 以内,误差小于 15%. 这说明,该方法可有效地进行植筋构件的耐火极限预测.

表 2 计算耐火极限对应的植筋胶温度及耐火极限计算值与试验值对比
Tab. 2 Temperatures of adhesive corresponding to the fire resistance and comparison of test and prediction

试件	植筋胶温度/°C	试验值/min	计算值/min	误差/%
PIRCS-25-15d	145	73	84	15.07
PIRCS-25-20d	155	93	86	-7.53
PIRCS-40-15d	138	91	103	13.19
PIRCS-40-20d	149	133	110	-17.29
PIRCS-60-15d	125	97	109	12.37
PIRCS-60-20d	138	137	—	—

3 结 论

通过理论分析和试验比较,探讨了高温下植筋连接构件的耐火极限预测方法,得出以下主要结论:

1) 采用等效截面法结合单根植筋极限承载力计算公式提出的耐火极限预测方法,可定量计算高温下植筋连接构件的耐火极限.

2) 植筋连接构件耐火极限试验表明,保护层厚度和植筋深度的增加均可提高构件的耐火极限. 当保护层不超过 40 mm 时,耐火极限受保护层的影响较大. 同种保护层情况下,植筋深度的增加可增加植筋构件的耐火极限,且当保护层大于 40 mm 后,增加植筋深度可显著增加植筋构件的耐火极限.

3) 由本文计算得到的耐火极限与试验值能较好地吻合,其误差都在 15% 左右,差值一般都在 15 min 以内,可以使用该方法进行植筋构件的耐火极限计算.

参考文献

[1] 熊学玉,许立新,胡家智. 化学植筋的拉拔试验研究[J]. 建筑技术,2001,31(6):383-384.
XIONG X Y, XU L X, HU J Z. Pull-out experiment study of chemically bonded rebar[J]. Architecture Technology, 2001, 31(6): 383-384. (In Chinese)

[2] 谢群. 化学植筋式后锚固连接群锚受力性能试验研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院,2006:38-50.
XIE Q. Experimental study on behavior of bonded-in reinforcement anchorage group[D]. Shanghai: College of Civil Engineering, Tongji University, 2006:38-50. (In Chinese)

[3] 司伟建,周新刚,黄金枝,等. 混凝土结构植筋黏结锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构,2001,31(3):9-12.
SI W J, ZHOU X G, HUANG J Z, et al. Experimental study on post-embedding technology with epoxy mortar as bonding agent[J]. Building Structure, 2001, 31(3): 9-12. (In Chinese)

- [4] 阎锋,张惠英,王稚,等. 结构胶植筋混凝土柱受往复荷载作用的试验研究[J]. 建筑结构,2003,33(10):37-39.
YAN F, ZHANG H Y, WANG Z, *et al.* Experimental research on the behavior of RC columns with post-installed chemically bonded longitudinal rebars under reciprocating load [J]. Building Structure,2003,33 (10): 37-39. (In Chinese)
- [5] 张建荣,吴进,杨建华,等. 植筋搭接混凝土梁静力及疲劳受弯试验研究[J]. 建筑结构学报,2005,26(5):38-45.
ZHANG J R, WU J, YANG J H, *et al.* Experimental research on the behavior of concrete beams with adhesive reinforcement under static and fatigue bending loads[J]. Journal of Building Structure, 2005, 26(5):38-45. (In Chinese)
- [6] EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-2; general rules-structural fire design[S]. Brussels: European Committee for Standardization,2004:30-34.
- [7] EN 1993-1-2:2005 Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-2; general rules-structural fire design[S]. Brussels: European Committee for Standardization,2005:27-44.
- [8] FISHER. Technical Handbook-Asia [M]. 4th ed. Waldachtal: Fisher Group of Companies,2008:10-15.
- [9] KUNZ J. Fire design; state of the art [R]. Shanghai: Hilti Corporation,2006:11-16.
- [10] 郑文忠,侯晓萌,王英. 混凝土及预应力混凝土结构抗火研究现状与展望[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(12):1-18.
ZHENG W Z, HOU X M, WANG Y. Progress and prospect of resistance of reinforced concrete and prestressed concrete structures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016,48(12):1-18. (In Chinese)
- [11] 侯晓萌,郑文忠. 火灾后预应力混凝土连续板力学性能试验与分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2010,37(2):6-13.
HOU X M, ZHENG W Z. Experiment on and analysis of the mechanical performance of unbonded prestressed concrete continuous slab after elevated temperature[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2010, 37(2): 6-13. (In Chinese)
- [12] 袁广林,刘涛,闫玉红. 高温后RC植筋边节点反复荷载的试验研究[J]. 中国矿业大学学报,2008,37(1):19-23.
YUAN G L, LIU T, YAN Y H. Experimental study of behaviors of RC structure's exterior joints with post-embedded bars under cyclic loading after treatment at high temperature [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1):19-23. (In Chinese)
- [13] 闫玉红. 焊接高温对钢筋混凝土结构植筋锚固性能影响的分析[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(1):84-86.
YAN Y H. Analysis on influence of high welding temperature on anchorage behaviors of post-embedded bars in reinforced concrete structures[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010,8(1):84-86. (In Chinese)
- [14] 刘长青,余江滔,陆洲导,等. 高温下植筋黏结-滑移性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2010,38(11):1579-1585.
LIU C Q, YU J T, LU Z D, *et al.* Experimental study on bond-slip behavior of Post-installed rebar at high temperature [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010,38 (11): 1579-1585. (In Chinese)
- [15] 刘长青,王孔藩,陆洲导. 高温中单根植筋极限承载力计算方法分析[J]. 结构工程师,2011,27(5):85-89.
LIU C Q, WANG K F, LU Z D. Design method of single post-installed rebar exposed to high temperature [J]. Structural Engineers, 2011, 27(5):85-89. (In Chinese)
- [16] 陆洲导,刘媛,余江滔,等. 火灾中植筋连接构件的抗火性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2012,32(6):686-692.
LU Z D, LIU Y, YU J T, *et al.* Experimental study on the anti-fire performance of post-installed rebar connection members in a fire [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(6): 686-692. (In Chinese)
- [17] 刘长青. 火灾(高温)下植筋连接构件抗火性能试验与理论研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院,2010:46-70.
LIU C Q. Experimental study on fire resistance behavior of post-installed rebar connection exposed to fire (high temperature) [D]. Shanghai: College of Civil Engineering, Tongji University, 2010:46-70. (In Chinese)
- [18] DBJ/T 15-81-2011 建筑混凝土结构耐火设计技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:41-54.
DBJ/T 15-81-2011 Code for fire resistance design of concrete building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011:41-54. (In Chinese)
- [19] 王晓璐,查晓雄,朱庸. GFRP筋混凝土梁耐火性能计算方法[J]. 建筑结构学报,2014,35(3):119-127.
WANG X L, ZHA X X, ZHU Y. Calculation methods for fire resistance of GFRP reinforced concrete beams [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3): 119-127. (In Chinese)
- [20] 毛小勇,肖岩. 标准升温下轻钢-混凝土组合梁的抗火性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2005,32(2):64-70.
MAO X Y, XIAO Y. Behavior of lightweight steel-concrete composite beams subjected to standard fire[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2005, 32(2): 64-70. (In Chinese)
- [21] ISO 834-1-1999 Fire resistance tests, elements of building construction: Part 1 general requirements [S]. Geneva,Switzerland: International Organization for Standardization, 1999: 22-23.