

# Research on Fire Performance of CFRP Reinforced Concrete Beams with Effect of Cracks

Yong Zhu<sup>1</sup>, Xiaoxiong Zha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hutchison Property Group Limited Shenzhen Branch, Shenzhen Guangdong

<sup>2</sup>Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen Guangdong

Email: zhuyongtina@163.com

Received: Mar. 12<sup>th</sup>, 2017; accepted: Mar. 28<sup>th</sup>, 2017; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2017

---

## Abstract

Carbon fiber reinforced polyester (CFRP) bars are used in the concrete members for its good corrosion resistance. Normal fire resistance analysis doesn't consider the cracks, which doesn't conform to reality and results security problem. This paper simulates the room fire with ISO834 standard temperature curve. The fire resistance and load capacity of CFRP reinforced concrete beams under the bending load and temperature load are analyzed. Comparing the effect of cracks on the CFRP reinforced concrete beams with different cover thicknesses, reinforcement ratios and load values under fire, suggestions for fire designing work are given in the end.

## Keywords

CFRP Bars, Crack, High Temperature, Bearing Capacity

---

# 考虑裂缝影响的CFRP筋组合梁耐火性能研究

朱庸<sup>1</sup>, 查晓雄<sup>2</sup>

<sup>1</sup>和记黄埔地产深圳分公司, 广东 深圳

<sup>2</sup>哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳

Email: zhuyongtina@163.com

收稿日期: 2017年3月12日; 录用日期: 2017年3月28日; 发布日期: 2017年3月31日

---

## 摘要

碳纤维增强塑料筋(CFRP筋)因其耐腐蚀等优点被应用于组合梁。现在研究其耐火性能的计算一般认为混

混凝土没有开裂, 与实际情况存在差别, 并带来安全问题。本文基于ISO834标准升温曲线模拟CFRP组合梁在室内火灾下的情况, 考虑CFRP筋组合梁在弯曲荷载和温度荷载共同作用下的耐火极限和受力分析。通过建立火灾下考虑裂缝影响的CFRP筋组合梁热力耦合模型, 得到裂缝对不同保护层厚度、配筋率和作用荷载比的CFRP筋混凝土梁耐火极限的影响规律, 总结出CFRP筋组合梁的防火相关设计建议。

## 关键词

CFRP筋, 裂缝, 高温, 承载力

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

碳纤维增强塑料筋 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics)具有质量轻、强度高、耐腐蚀性好等优点, 使其有可能代替钢材而被应用于土木工程。CFRP 筋是由连续纤维材料和粘结胶体组成的复合材料, 单根纤维丝的直径非常小, 这些纤维丝通过粘结剂粘合在一起。和钢筋相比, CFRP 筋材料更不耐火。目前, 关于 CFRP 筋混凝土结构的抗火性能分析较少。Rafi [1]进行了 CFRP 筋梁的火灾试验, SaafiM [2], Faruqi MA [3]等人对高温下 FRP 筋的材料性能进行了试验和理论研究。国内欧进萍等人[4]对 CFRP 筋混凝土梁的力学性能进行了试验和分析, 王晓璐等人[5]对高温下 GFRP 筋力学性能进行试验和理论研究。目前关于 CFRP 筋混凝土梁的研究, 均未考虑混凝土梁底部由于受拉形成的裂缝对耐火极限的影响。在实际火灾中, 裂缝影响梁截面温度场的分布, 从而影响 CFRP 筋混凝土梁火灾下的承载力。本文建立裂缝模型分析了保护层厚度、配筋率和作用荷载比对梁耐火极限的影响, 定量给出了 CFRP 筋混凝土梁耐火极限的简化计算方法, 为实际防火设计提供参考。

## 2. 有限元模型

采用 ABAQUS 有限元分析软件, 建立考虑裂缝影响的 CFRP 筋混凝土梁的热力耦合模型。混凝土的力学参数按照陆洲导[6]提出的高温下混凝土受压应力-应变表达式选取, 热工参数采用 T.T. Lie [7]提出的混凝土热工参数。CFRP 筋的材料参数参照国外文献[8] [9] [10]选取。CFRP 筋混凝土简支梁为三分点加载, 三面受火, 采用标准升温曲线 ISO-834。

耐火极限的判别准则有三点[11]: 结构失去支持能力、完整性、隔火作用。梁、楼板等受弯承重构件, 挠曲率发生突变, 为失去支持能力的情况, 当简支钢筋混凝土梁、楼板和预应力钢筋混凝土楼板跨度总挠度值分别达到试件计算长度的 2%、3.5%和 5%时, 则表明试件失去支持能力。本文模拟分析根据构件失去支持能力来判断达到耐火极限。

考虑到裂缝对梁截面温度场分布的影响, 通过 ABAQUS 用户子程序, 判断出现裂缝的单元, 改变开裂处单元的材料属性, 以模拟实际火灾中, CFRP 筋混凝土梁产生裂缝后, 裂缝区域温度场的改变。由子程序 USDFLD 调用通用程序 GETVRM 获取材料积分点信息, 判断该积分点的受拉应变是否大于极限拉应变 0.001 [12], 即是否出现裂缝。判断出现裂缝的单元, 通过定义的场变量来改变材料属性。取开裂单元的传导系数为良好导热材料体的传热系数, 比热增大。

有限元处理裂缝的方式是将裂缝弥散于整个单元, 以分布的裂缝来代替单独的裂缝。即在裂缝出现

以后, 仍假定材料是连续的, 用处理连续介质力学的方法来处理, 认为裂缝分布于整个单元内部。裂缝的大小不能从计算结果中直观的看到, 而是以单元变形的形式表现出来。

本文引入开裂应变  $\varepsilon_{ck}$  :

$$\varepsilon_{ck} = \varepsilon_{total} - \varepsilon_{th} - \varepsilon_{mec} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_{total}$  为总应变;  $\varepsilon_{th}$  为热应变;  $\varepsilon_{mec}$  为力学应变, 取极限拉应变 0.001。

首先计算不考虑裂缝的 CFRP 筋混凝土梁火灾下受力, 输出达到耐火极限时, 梁跨中底部受拉单元的总应变  $\varepsilon_{total}$  和热应变  $\varepsilon_{th}$ , 由式(1)计算得到梁破坏时达到的开裂应变。由式(2)计算得到裂缝扩展最终的宽度。

$$L_{ck} = \varepsilon_{ck} L \quad (2)$$

式中:  $L_{ck}$  为裂缝宽度;  $L$  为开裂单元长度;  $\varepsilon_{ck}$  为开裂应变。

为解决开裂单元连续的问题, 通过得到的裂缝宽度预设裂缝, 指定裂缝发展的区域。为确定预设裂缝合理的分布数量, 本文分别设置裂缝数量为 5、7、9、11 条, 将总的裂缝宽度均布到每条裂缝。裂缝布置为在两侧靠近支座  $1/6L_0$  分别布置一条裂缝, 剩余裂缝均布于  $2/3L_0$  范围内, 见图 1。

预设裂缝区域为裂缝发展的范围, 在计算过程中通过 ABAQUS 用户子程序判断是否出现开裂, 对开裂单元更改材料属性实现截面温度场的改变。设置不同数量裂缝的耐火极限比较, 见表 1。

本文预设裂缝改变的是开裂单元的热工参数, 裂缝总宽度是不变的, 并且大部分裂缝均分布在  $2/3$  跨度内。设置不同的裂缝数量对计算 CFRP 筋混凝土梁的耐火极限的有一定的影响, 但影响并不明显。由表 1 可知, 裂缝数量的改变对 CFRP 筋混凝土梁耐火极限的影响不到 5%, 其中设置 9 条裂缝和 11 条裂缝对耐火极限改变的影响仅为 1.3%。本文后续分析中均采用全梁设置 11 条裂缝。对比考虑和不考虑裂缝的梁挠度随时间变化的曲线, 见图 2, 可知裂缝对梁耐火极限的影响较大, 在模拟实际火灾分析 CFRP 筋混凝土梁耐火性能时, 应充分考虑裂缝对其耐火极限的影响。

### 3. 主要影响因素分析

本文分析了保护层的厚度, 配筋率和作用荷载值的大小对 CFRP 筋混凝土梁耐火极限的影响, 保护

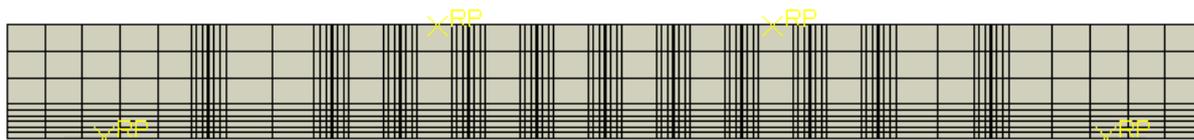


Figure 1. Schematic layout of cracks

图 1. 裂缝布置示意图

Table 1. Effect of different number of cracks on fire resistance

表 1. 设置不同数量裂缝对耐火极限的影响

裂缝数量	裂缝宽度(mm)	耐火极限(s)	影响率(%)
0	0.00	9232	0.0
5	1.89	7978	13.6
7	1.35	7807	15.4
9	1.05	7723	16.3
11	0.86	7603	17.6

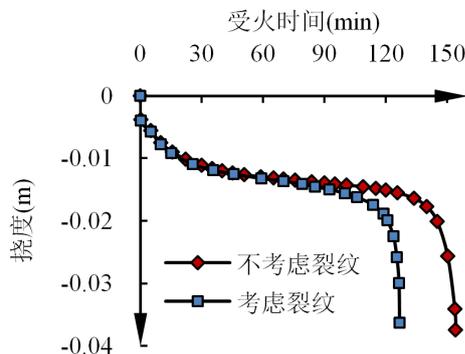


Figure 2. Comparison of the influence of crack on the deflection of beam with time of fire

图 2. 裂纹影响梁挠度随受火时间变化曲线对比

层厚度  $c$  分别取 30 mm, 40 mm, 50 mm, 不同配筋率  $\rho$  分别为 0.6%, 0.8%, 1.0%, 作用荷载与梁承受极限荷载的比值  $P/P_u$  分别为 0.35, 0.5, 0.65。梁长  $L = 2100$  mm, 净跨  $L_0 =$  为 1800 mm, 截面高度为  $h = 200$  mm, 截面宽度为  $b = 180$  mm。底部配置两根 CFRP 筋。混凝土的立方体抗压强度为 48.7 MPa, CFRP 筋弹性模量为 124 Gpa, 屈服强度为 1080 Mpa。

### 3.1. 保护层厚度的影响

受三分点集中力作用, 梁在短时间内达到某一挠度。随受火时间增加, 外部环境温度逐渐升高, CFRP 筋强度和弹性模量随温度升高迅速降低, 梁的整体刚度降低, 挠度逐渐缓慢增加。到接近于耐火极限时, 挠度-受火时间曲线出现急剧下降, 梁很快达到其耐火极限。由可以看到, 混凝土保护层越厚, CFRP 筋混凝土梁的挠度反应越小。

在配筋率和作用荷载比相同的条件下, 混凝土保护层越厚, CFRP 筋的温度增长越慢, 相应强度降低的就越少, 同时梁底部裂缝开展向上延伸至 CFRP 筋处所需时间也 longer。CFRP 筋混凝土梁的耐火极限随保护层厚度的增加近似呈现线性增长的趋势。

### 3.2. 配筋率的影响

随着配筋率的增加, 梁的耐火极限增大。火灾下随着温度的升高, CFRP 筋的抗拉强度和弹性模量大幅下降, 裂缝的不断扩展使得 CFRP 筋受混凝土的保护减弱, 当裂缝延伸至混凝土保护层后, 钢筋暴露于明火之中。与增加保护层厚度对耐火极限的提高相比, 增大配筋率对耐火极限的提高并不明显。

配筋率的增大能抑制裂缝的开展, 当作用荷载较大时, 梁在受火之前裂缝已经形成, 配筋率增大对裂缝的抑制作用增强, 因此作用荷载比越大时, 配筋率对耐火极限的提高越明显。

### 3.3. 荷载比的影响

简支梁内力与作用的荷载值相关, 保护层厚度和配筋率相同的条件下, 作用荷载越大, 梁产生的挠曲越大, 火灾下其耐火极限越小。随着荷载比的增加, 梁的耐火极限迅速降低, 作用荷载比对 CFRP 筋混凝土梁的耐火极限影响显著, 在抗火设计中应就不同荷载比的情况分别进行考虑, 见图 3。

梁的耐火极限随保护层厚度、配筋率的增加而增大, 随荷载比增大而减小。随着作用荷载比的增大, 梁底部受拉形成的裂缝也增多, 裂缝扩展降低梁的耐火极限, 增大配筋率能抑制裂缝的扩展, 从而在一定程度上阻止耐火极限的降低。

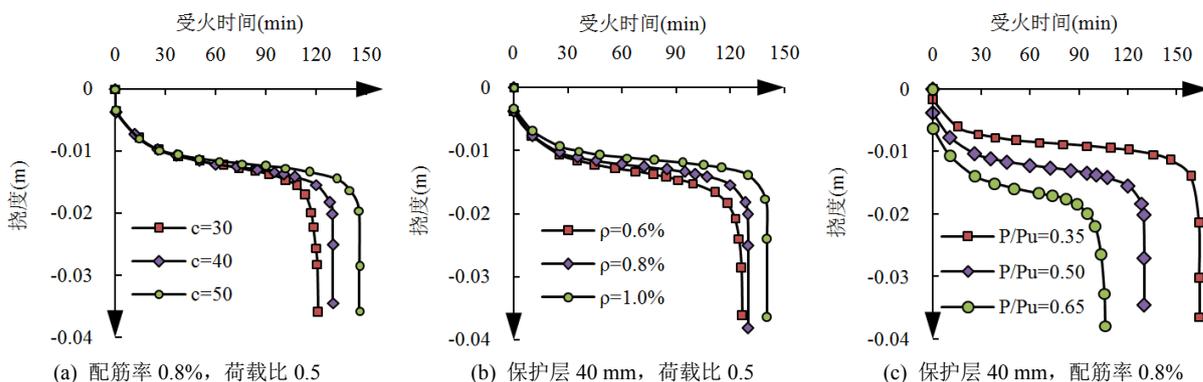


Figure 3. Deflection of beam with fire time varied with parameters

图 3. 各参数下梁挠度随受火时间的变化曲线

Table 2. Fire resistance of CFRP reinforced concrete beams

表 2. CFRP 钢筋混凝土梁的耐火极限

保护层厚度(mm)	荷载比	配筋率(%)		
		0.6	0.8	1.0
30	0.35	148	150	154
	0.5	110	118	126
	0.65	69	93	100
40	0.35	162	164	168
	0.5	127	130	140
	0.65	90	106	119
50	0.35	177	179	181
	0.5	142	146	157
	0.65	108	117	134

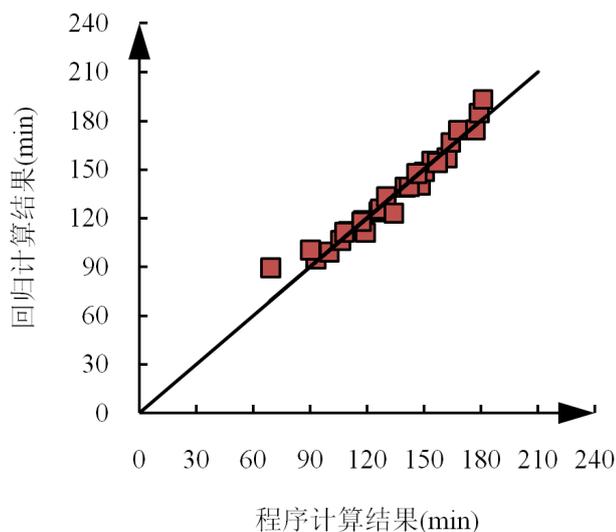


Figure 4. Comparison of the value of fire resistance formula and finite element method

图 4. 耐火极限公式值与有限元计算值比较

#### 4. 耐火极限简化公式

通过综合考虑保护层厚度, 配筋率和作用荷载比三个因素对梁耐火极限的影响, 对计算结果进行整理和分析, 见表 2, 回归给出 CFRP 筋混凝土梁的耐火极限与和保护层厚度、配筋率和荷载比之间的定量关系为:

$$R_f = 3.2(c + 52) \cdot \rho^{0.2} \cdot e^{-1.5P/P_u} \quad (3)$$

式中:  $R_f$  为耐火极限(min);  $c$  为保护层厚度(mm);  $\rho$  为配筋率(%);  $P/P_u$  为作用荷载比。

将式(3)的回归计算结果与本文计算结果比较见图 4, 可以看出两种计算结果总体上吻合较好。通过进一步校准和验证, 公式可以预测耐火极限, 为实际防火设计提供参考。

#### 5. 结论

(1) 本文提出考虑裂纹影响的热力耦合模型, 通过编制 ABAQUS 子程序模拟裂纹的发生, 定义场变量实现热传导。

(2) 裂缝对梁耐火极限的影响较大, 在模拟分析梁的耐火性能时, 应充分考虑裂缝对其耐火极限的影响。

(3) 随着保护层厚度和配筋率的增加, CFRP 筋混凝土梁耐火极限增大。与增加保护层厚度对耐火极限的提高相比, 增大配筋率对耐火极限的提高并不明显。作用荷载比越大, 配筋率对耐火极限的提高越明显。荷载比对耐火极限影响显著, 随着荷载比的增加, 耐火极限迅速降低。

(4) 回归给出 CFRP 筋混凝土梁耐火极限公式, 公式与有限元结果吻合良好, 通过进一步研究和验证, 可为实际防火设计提供参考。

#### 基金项目

本论文得到国家科技支撑计划(项目号 2014BAH25F00)的支持, 在此表示感谢。

#### 参考文献 (References)

- [1] Rafi, M.M., Nadjai, A. and Ali, F. (2007) Fire Resistance of Carbon FRP Reinforced-Concrete Beams. *Magazine of Concrete Research*, **59**, 245-255. <https://doi.org/10.1680/macr.2007.59.4.245>
- [2] Saafi, M. (2002) Effect of Fire on FRP Reinforced Concrete Members. *Composite Structures*, **58**, 11-20.
- [3] Faruqi, M.A., Roy, S. and Salem, A. (2012) Elevated Temperature Deflection Behavior of Concrete Members Reinforced with FRP Bars. *Journal of Fire Protection Engineering*, **22**, 183-196. <https://doi.org/10.1177/1042391512447045>
- [4] 欧进萍, 王勃, 何政. CFRP 加筋混凝土梁的力学性能试验与分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(12): 8-12.
- [5] 王晓璐, 查晓雄. 高温下 GFRP 筋力学性能的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(9): 75-81.
- [6] 陆洲导, 朱伯龙, 周跃华. 钢筋混凝土简支梁对火灾反应的试验研究[J]. 土木工程学报, 1993, 25(3): 47-54.
- [7] Lie, T.T. and Stringer, D.C. (1994) Calculation of the Fiber Resistance of Steel Hollow Structure Section Columns Filled with Plain Concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **21**, 382-385. <https://doi.org/10.1139/194-041>
- [8] Saafim (2002) Effect Fire on FRP Reinforced Concrete Members. *Composite Structures*, **58**, 11-20.
- [9] Baingod, K. (1998) Fire Resistance of FRP Reinforced Concrete Slabs. RC Internal Report No. 758, Institute for Research in Construction, Ottawa, 1-37.
- [10] Bisbyla (2003) Fire Behaviour of FRP Reinforced or Confined Concrete. Department of Civil Engineering, Queen's University, Kingston.
- [11] 中华人民共和国国家标准. GB50045-95. 高层民用建筑设计防火规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
- [12] Hu, H., Lin, F. and Jan, Y. (2004) Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Fiber-Reinforced Plastics. *Composite Structures*, **63**, 271-281.

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)