

# 高温后 CFRP-MOC-混凝土界面粘结特性研究

赵少伟,吕冉,郭蓉,王佳

(河北工业大学土木与交通学院,天津 300401)

**摘要** 目的 研究高温处理后氯氧镁水泥胶(MOC)粘贴 CFRP 布加固混凝土的粘结性能,为高温环境下 CFRP 加固混凝土的工程应用提供参考。方法 采用单面剪切试验,分析温度作用以及 CFRP 布宽度对 CFRP-MOC-混凝土界面、荷载-滑移、应变分布等粘结性能指标的影响,对高温后 CFRP-MOC-混凝土界面的有效粘结长度和极限承载力进行研究。结果 随着温度的升高,极限承载力下降,界面整体刚度降低,粘结界面的最大应变不断降低;随着 CFRP 布宽度的增加,极限承载力增大,界面整体刚度增加,粘结界面的最大应变也增大。结论 笔者建立的高温损伤后 CFRP-MOC-混凝土有效粘结长度及界面承载力计算模型可信度较高,可以用来预测高温环境下 CFRP-MOC-混凝土界面承载力。

**关键词** 粘结性能;MOC;混凝土;高温处理;有效粘结长度;界面承载力

中图分类号 TU375 文献标志码 A

## Research on Bonding Characteristics of CFRP-MOC-Concrete Interface after High Temperature

ZHAO Shaowei, LI Ran, GUO Rong, WANG Jia

(School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin, China, 300401)

**Abstract:** Magnesium oxychloride cement (MOC) bonding CFRP cloth to reinforce concrete was used to investigate the bonding performance after high temperature treatment. It provides reference for engineering application of CFRP reinforced concrete under high temperature environment. Single shear test was used to analyze the influence of temperature and width of CFRP cloth on bonding performance such as load-slip, strain distribution of CFRP-MOC-concrete interface. Effective bond length and ultimate bearing capacity of CFRP-MOC-concrete interface after high temperature were studied. With the increase of temperature, ultimate bearing capacity will decrease, overall stiffness of interface will decrease, and maximum strain of bonding interface will decrease continuously. With the increase of the width of CFRP cloth, the ultimate bearing capacity and the overall stiffness of the interface increase, as well as maximum strain of bonding interface. The calculation model of effective bond length and interface bearing capacity of CFRP-MOC

收稿日期:2022-07-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51878238)

作者简介:赵少伟(1972—),男,教授,博士,主要从事混凝土与预应力混凝土理论等方面研究。

concrete after high temperature damage is established, which can be used to predict the interface bearing capacity of CFRP-MOC concrete under high temperature environment.

**Key words:** bonding performance; MOC; concrete; high temperature treatment; effective bond length; interfacial bearing capacity

碳纤维增强复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) 具有施工方便、强度高、自重轻、耐久性好等优点,已被广泛应用于建筑结构加固领域<sup>[1-2]</sup>,目前该加固技术最常见的配套胶黏剂为环氧树脂胶,其热稳定性以及长期化学稳定性低于无机胶凝材料,玻璃化温度  $T_g$  较低 (一般在 50 ~ 80 °C)<sup>[3]</sup>,当温度达到玻璃化温度后,其宏观力学性能会急剧下降,出现粘结失效的现象,因而在露天室内高温环境或者火灾高温辐射环境中不适宜用环氧树脂胶做界面胶黏剂,极大地限制了 CFRP 加固技术的应用。

氯氧镁无机胶凝材料 (Magnesium Oxychloride Cement, MOC) 具有快硬高强、耐高温性能好的优点,与环氧树脂胶相比,更适合高温环境加固。为了研究高温条件下 MOC 作为胶黏剂用于 CFRP 加固混凝土系统的可靠性,众多学者进行了大量研究:陈忠范<sup>[4]</sup>进行了高温下 MOC 粘贴 CFRP 布加固混凝土梁的抗弯性能试验,结果表明,MOC 具有良好的耐高温性能,但当温度达到 300 °C 时,由于水分丧失,MOC 表面会有大量裂纹产生;张国强<sup>[5]</sup>通过进行 MOC 粘贴 CFRP 布加固混凝土板高温性能试验发现,采取有效的防火措施可以很大程度上减少高温时 MOC 强度的降低,适当增加防火涂料的厚度能够很好地提高加固构件的耐火性能;徐明<sup>[6]</sup>进行了 MOC 粘贴 CFRP 板高温后拉伸性能试验研究,试验结果表明,25 °C 时,MOC 粘贴 CFRP 板的抗拉强度与环氧树

脂胶粘贴 CFRP 板相当,当温度到达 300 °C 时,MOC 粘贴 CFRP 板的抗拉强度仍可以达到 25 °C 时抗拉强度的 70% 左右。以上研究证明了高温环境下采用 MOC 作为胶黏剂用于 CFRP 加固混凝土系统是可行的。总体来看,有关 MOC 作胶黏剂的研究多集中在高温下加固构件承载能力方面,并没有从界面的粘结性能方面进行深入研究,不利于 MOC 在加固技术上的进一步推广,因此亟需开展以 MOC 为胶黏剂的 CFRP-混凝土界面高温粘结性能研究。

基于上述分析,笔者通过采用自主研发的改性 MOC 作为胶黏剂,对 CFRP 加固混凝土试件在高温后进行了一系列单面剪切试验;通过对高温后 CFRP-MOC-混凝土界面粘结性能演化规律分析,得到界面极限承载力、有效粘结长度随温度升高的变化规律;进一步建立高温后 CFRP-MOC-混凝土界面有效粘结长度模型、界面承载力模型,有效地预测高温环境下 CFRP-MOC-混凝土界面承载力,研究成果能为高温环境下采用 MOC 进行 CFRP 加固设计提供重要的理论指导。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验选用 C30 强度等级的混凝土,配合比见表 1。该混凝土 28 d 立方体抗压强度实测值为 33.1 MPa。试验所用碳纤维布为天津卡本科技集团股份有限公司生产,其相关力学性能如表 2 所示。

表 1 混凝土配合比

Table 1 The mix ratio of concrete

kg/m<sup>3</sup>

强度等级	w(水)	w(水泥)	w(砂)	w(碎石)	w(矿粉)	w(粉煤灰)	w(外加剂)
C30	180	215	820	1 000	90	90	8.3

表2 CFRP 布力学性能

Table 2 The mechanical properties of CFRP cloth

产品型号	计算厚度/ mm	纤维密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	层间剪切强度/ MPa	伸长率/ %
CFS-I-300	0.167	1 800	3 400	240	45	1.71

试验采用本课题组自主研制的改性 MOC,即各组分的物质的量比为  $n_{\text{MgO}}:n_{\text{MgCl}_2}:n_{\text{H}_2\text{O}}=9:1:10.85$ ,羟基乙酸掺量 2%、硼酸镁晶须掺量 2%。图 1 为不同温度处理后 MOC 的力学性能变化曲线。当温度低于 300 °C 时,MOC 力学性能保持较好,当温度达到

400 °C 时,MOC 强度及模量快速下降,说明经过高温作用后,MOC 内部主要强度相发生转变,同时 MOC 中的水化结晶相受到高温作用开始脱水分解,晶体结构遭到破坏,这一现象是不可逆的,从而使得 MOC 的相关力学性能下降越来越快。

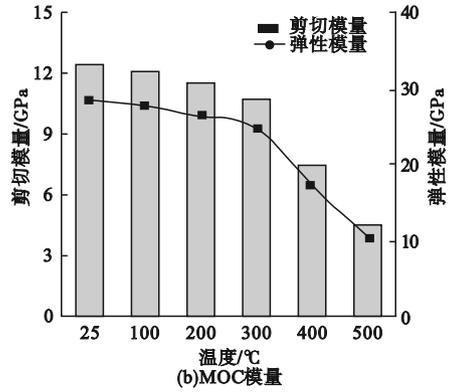
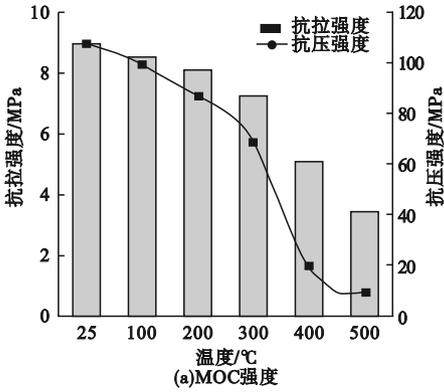


图1 不同温度处理后 MOC 力学性能

Fig. 1 The mechanical properties of MOC under different temperatures

## 1.2 试件设计

试验采用单面剪切试件,混凝土试块长宽高均为 150 mm × 150 mm × 300 mm。CFRP 布粘结区长度为 200 mm,在混凝土试块靠近加载端处预留 40 mm 的非粘结区,防止靠近加载端处的混凝土发生劈裂,试件示意如图 2 所示。

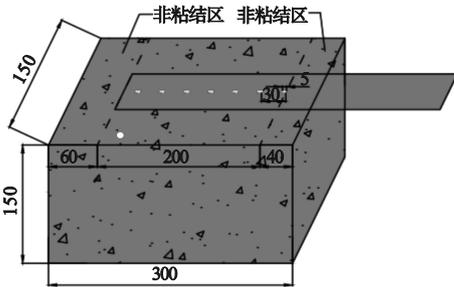


图2 单剪试件示意图

Fig. 2 The schematic diagram of single shear specimen

相关研究<sup>[4,7-9]</sup>表明,当温度达到 500 °C 时,MOC 胶体已基本失效,混凝土强度显著下降,因此本次单剪试验设定的升温范围为 100 ~ 500 °C,升温速度为 3 °C/min,到达目标温度后恒温 3 h。为防止混凝土试块因含水率过高在高温炉中发生爆炸,在试块进行高温处理前,先将其放置于烘箱中 105 °C 烘干 24 h。单剪试件在 25 °C 条件下放置 3 d,进行 CFRP 布-混凝土界面单面剪切试验。

试验设计共考虑两个影响因子:温度分别为 25 °C(室温)、100 °C、200 °C、300 °C、400 °C 和 500 °C; CFRP 布宽度分别为 50 mm、75 mm、100 mm。单剪试验设计分组如表 3 所示,分为 8 组,每组 3 个平行试块。

表3 单剪试验方案设计

Table 3 The design scheme of single shear test

试件编号	温度/℃	CFRP 布宽度/mm	数量/个
S-50	25	50	3
H100-50	100	50	3
H200-50	200	50	3
H300-50	300	50	3
H400-50	400	50	3
H500-50	500	50	3
H100-75	100	75	3
H100-100	100	100	3

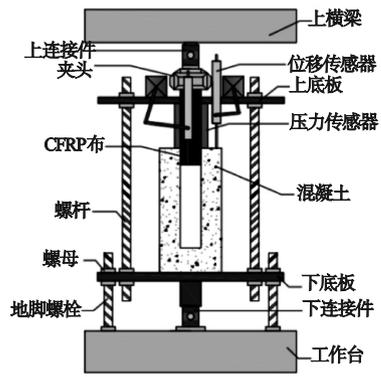
注:表中试件编号含义为温度-CFRP 布宽度,其中 S 为 25 ℃对比试件,H 为高温处理试件。

### 1.3 加载装置及测量方案

加载装置如图3所示。采用三思



(a)实物图



(b)示意图

图3 加载装置

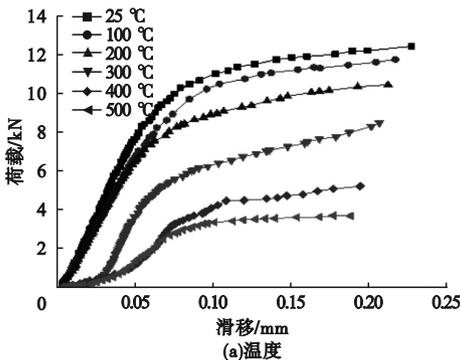
Fig. 3 The loading device

别采集各剪切试件在加荷过程中的界面滑移与荷载数据,得到在温度、CFRP 布宽度影响下 CFRP-混凝土界面荷载 - 滑移曲线,如图4所示。

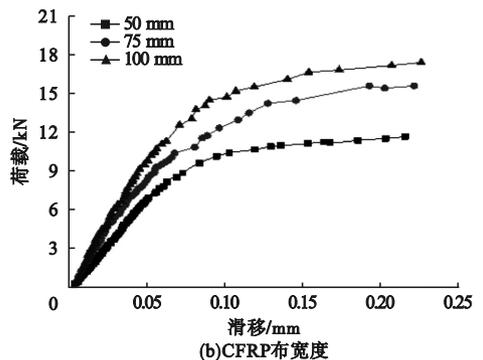
## 2 试验结果与分析

### 2.1 荷载 - 滑移曲线

通过拉拔端位移传感器与压力传感器分



(a)温度



(b)CFRP布宽度

图4 不同参数影响下加载端荷载 - 滑移关系曲线

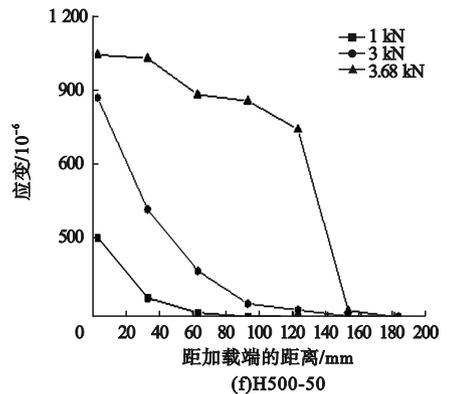
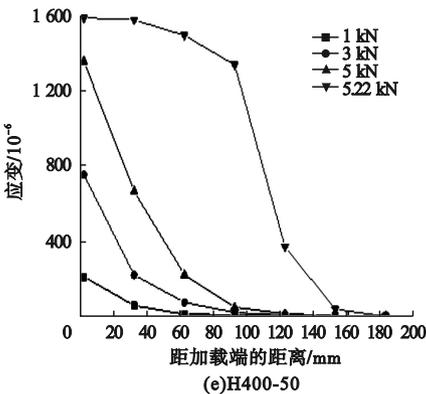
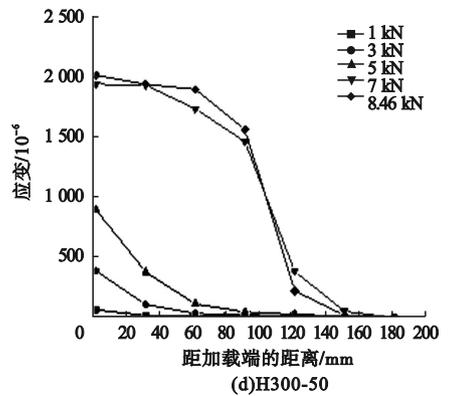
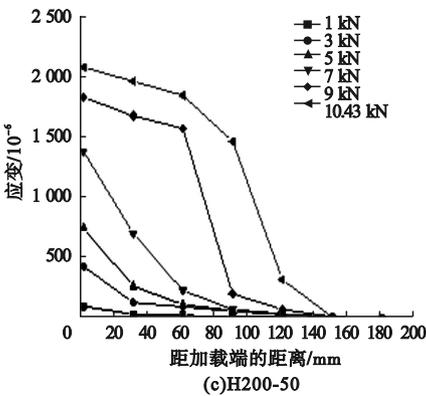
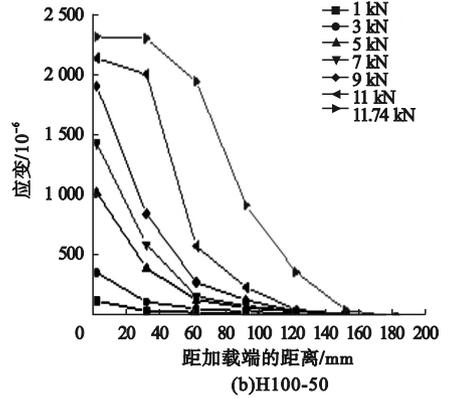
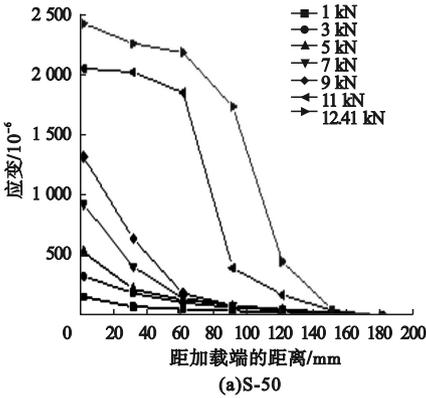
Fig. 4 The load-slip relationship curves of loading end under different parameters

由图4(a)可知,试件在CFRP布宽度为50 mm时,随着温度的升高,曲线的初始斜率和峰值荷载均减小,说明试件的整体界面刚度和极限承载力均随处理温度的升高而降低。这是由于高温处理后,MOC内部主要强度相发生转变,强度大幅降低。由图4(b)可知,在处理温度为100℃时,随着CFRP布宽度的增加,曲线的斜率和峰值荷载均增大,即试件的界面整体刚度和极限承载力均有所提

高。这是因为随着CFRP布宽度的增加,粘贴面积也在不断增大,因此CFRP加固混凝土的极限承载力也在增大。

### 2.2 应变分布规律

通过CFRP布表面粘贴的应变片与拉拔端压力传感器分别采集各剪切试件在加荷过程中的CFRP布应变与荷载数据,得到各级荷载下CFRP布的应变分布情况如图5所示。



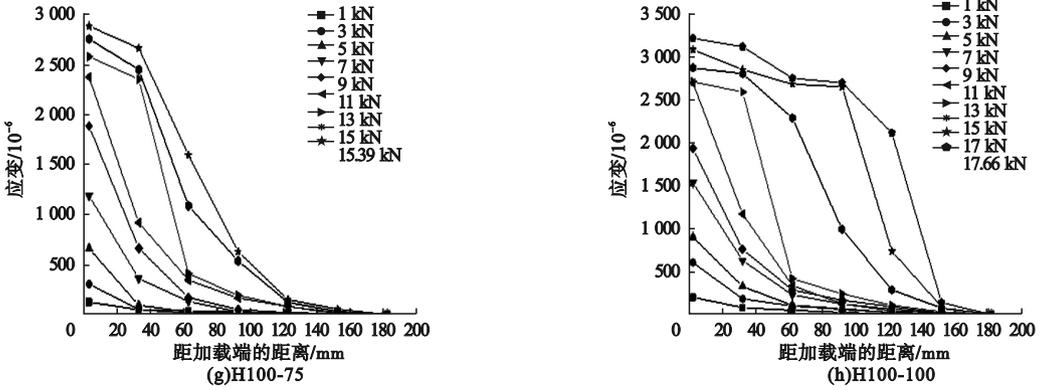


图5 各级荷载下 CFRP 布的应变分布

Fig.5 The strain distributions of CFRP cloth under various loads

由图 5(a) ~ (f) 对比可知,随着温度的增加,CFRP 最大应变不断减小。一方面是由于随着温度的增加,应力传递区域的长度变短,能够承受荷载的面积减少,使得试件界面承载力降低,CFRP 最大应变减少;另一方面,界面胶体的强度随温度升高逐渐降低,同样长度的界面承受的荷载降低了,CFRP 最大应变也就降低了。

由图 5(b)、(g)、(h) 对比可知,随着 CFRP 布宽度的增加,CFRP 最大应变不断增大。这主要是由于 CFRP 布宽度的增加使得界面粘结面积增大,界面能够提供的承载力增强,CFRP 最大应变随之增大;但是当 CFRP 布宽度发生变化时,应力传递区域的长度基本保持不变。

合,此时应力传递区域已经趋于稳定。参考刘生玮<sup>[12]</sup>对有效粘结长度的取值定义,取应变分布曲线上最大应变的 2% ~ 98% 时的粘结长度作为有效粘结长度。通过对各试件有效粘结长度值进行整理,可得到界面有效粘结长度随温度、CFRP 布宽度的变化规律,如图 6 所示。

### 3 高温后 CFRP-MOC-混凝土界面有效粘结长度模型

#### 3.1 有效粘结长度

为了更好地分析高温处理后有效粘结长度的变化规律,采用 M. Mali-Ahmadl 等<sup>[11]</sup>提出的退化公式(1)对应变分布曲线进行拟合。

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_0 + \frac{A}{1 + e^{\left(\frac{x-x_0}{B}\right)}} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon(x)$ 为距加载端  $x$  处的应变值; $\varepsilon_0$ 、 $x_0$ 、 $A$ 、 $B$  为拟合相关参数。

取图 5 中界面最大应变对应曲线进行拟

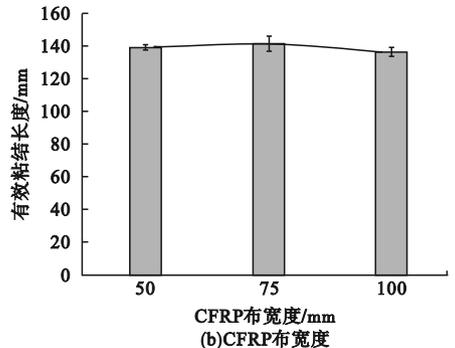
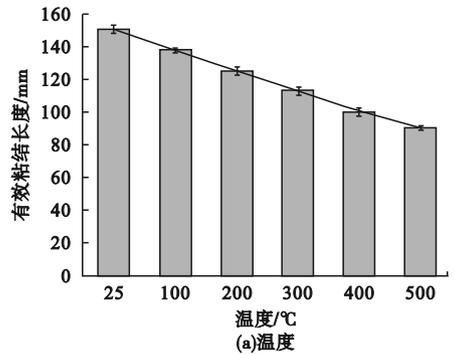


图6 温度、CFRP 布宽度对有效粘结长度的影响  
Fig.6 The influence of temperature and CFRP width on the effective bond length

由图6(a)可以看出,随着温度的升高,有效粘结长度不断减小。这是因为随着温度的升高,作为胶黏剂的MOC性能发生劣化,抗拉强度和剪切强度逐渐减小。由图6(b)可以看出,随着CFRP布宽度的变化,有效粘结长度值的浮动很小,可认为CFRP布的宽度不会引起有效粘结长度的变化。

### 3.2 高温后的有效粘结长度模型

由于本试验的界面破坏形式与CFRP-钢的相同,界面失效多发生在强度略显薄弱的粘结胶层,界面粘结长度的影响因素及变化规律相同,因此选择以《纤维增强复合材料加固修复钢结构技术规程》<sup>[13]</sup>中的有效粘结长度模型为基础对高温后的有效粘结长度模型进行修正,《纤维增强复合材料加固修复钢结构技术规程》(YB/T 4558—2016)中模型如式(2)所示。

$$L_e = 19 \frac{f_{t,a}}{E_a} \sqrt{E_f t_f \sqrt{t_a}} \quad (2)$$

式中: $f_{t,a}$ 为胶体的抗拉强度; $E_a$ 为胶体的弹性模量; $E_f$ 为CFRP布的弹性模量; $t_f$ 为CFRP布的厚度; $t_a$ 为胶层厚度。

由于本试验与基础模型之间存在着胶体和界面材性的差异,需要引入修正系数A来消除这种影响。笔者以25℃时CFRP宽度为50mm的试件S-50对应的有效粘结长度作为研究胶体和界面材性差异对有效粘结长度影响的基准值。将基准试块的参数代入计算模型中可以得到修正系数 $A=0.399$ ,则式(2)可以改写为

$$L_e = 7.581 \frac{f_{t,a}}{E_a} \sqrt{E_f t_f \sqrt{t_a}} \quad (3)$$

考虑高温处理对于有效粘结长度的影响,引入温度劣化系数 $\alpha_T$ 对有效粘结长度模型进行修正,如式(4)所示。

$$L_e = 7.581 \alpha_T \frac{f_{t,a}}{E_a} \sqrt{E_f t_f \sqrt{t_a}} \quad (4)$$

由式(4)可得:

$$\alpha_T = \frac{E_a L_e}{7.581 f_{t,a} \sqrt{E_f t_f \sqrt{t_a}}} \quad (5)$$

选取不同温度作用后的试件,将试验数据代入式(5),可得温度 $T$ 与 $\alpha_T$ 值关系。

以温度为自变量, $\alpha_T$ 值为因变量,对试件进行非线性拟合得到 $\alpha_T$ 与温度 $T$ 的函数曲线,如图7所示。

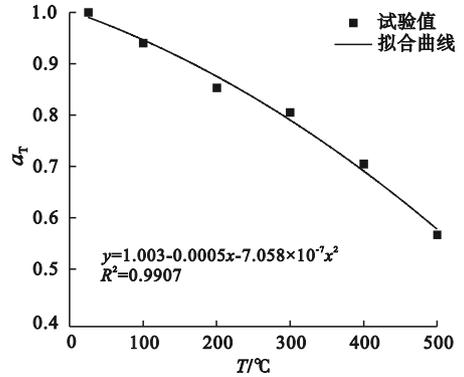


图7 温度修正系数 $\alpha_T$ 拟合曲线

Fig. 7 The fitting curve of temperature correction coefficient  $\alpha_T$

可得 $\alpha_T$ 值拟合公式:

$$\alpha_T = 1.003 - 0.0005T - 7.058 \times 10^{-7} T^2 \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)中可得到高温处理后,CFRP-MOC-混凝土界面有效粘结长度表达式:

$$L_e = (7.604 - 0.0008T - 5.351 \times 10^{-6} T^2) \times \frac{f_{t,a}}{E_a} \sqrt{E_f t_f \sqrt{t_a}} \quad (7)$$

## 4 高温后CFRP-MOC-混凝土界面承载力模型

### 4.1 界面承载力模型的选取

关于界面承载力,国内外学者给出了众多不同的数学模型<sup>[14-18]</sup>,通过研究可以发现,文献[14]中模型考虑的影响因素较全面,所以笔者在该模型的基础上对高温后的界面承载力模型进行拟合,文献[14]中模型如下:

$$P_u = \beta_l b_f \sqrt{2E_f t_f G_f} \quad (8)$$

$$\beta_1 = \begin{cases} \frac{L}{L_c} \left( 2 - \frac{L}{L_c} \right), & L < L_c \\ 1, & L \geq L_c. \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_u$  为界面承载力;  $\beta_1$  为粘结长度系数;  $b_f$  为 FRP 片材的宽度;  $E_f$  为 FRP 片材弹性模量;  $t_f$  为 FRP 片材厚度;  $L$  为粘结长度,  $L_c$  为有效粘结长度;  $G_f$  为界面断裂能。

### 4.2 高温后的界面承载力模型

高温后各试件的极限承载力如表 4 所示。

表 4 高温后试件极限承载力

Table 4 The interfacial bearing capacity of specimens after high temperature kN

试件编号	极限承载力	试件编号	极限承载力
S-50	12.41	H300-50	8.46
H100-50	11.74	H400-50	5.22
H200-50	10.43	H500-50	3.68

考虑高温处理对于界面承载力的影响, 引入温度劣化系数  $\beta_T$  对界面承载力模型进行修正, 则式(8)可改写为

$$P_u = \beta_T \beta_1 b_f \sqrt{2E_f t_f G_f}. \quad (10)$$

由式(10)可得:

$$\beta_T = \frac{P_u}{\beta_1 b_f \sqrt{2E_f t_f G_f}}. \quad (11)$$

选取不同温度处理后的加固试件, 将试验数据代入式(11)可得  $T$  值与  $\beta_T$  值之间的关系。

以温度为自变量,  $\beta_T$  值为因变量, 进行数据拟合可得  $\beta_T$  与温度  $T$  的函数关系, 如图 8 所示。

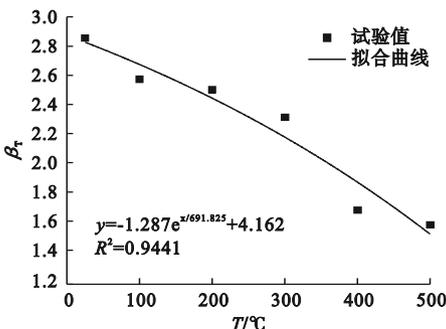


图 8 温度修正系数  $\beta_T$  拟合曲线

Fig. 8 The fitting curve of temperature correction coefficient  $\beta_T$

可得  $\beta_T$  值拟合公式为

$$\beta_T = -1.287e^{\frac{T}{691.825}} + 4.162. \quad (12)$$

将式(12)代入式(10)可获得高温后, CFRP-MOC-混凝土试件界面承载力表达式:

$$P_u = \beta_1 b_f \left( -1.287e^{\frac{T}{691.825}} + 4.162 \right) \sqrt{2E_f t_f G_f}. \quad (13)$$

## 5 结论

(1) CFRP-MOC-混凝土试件在 6 个不同温度下处理后, 界面破坏模式不同; 极限承载力、界面整体刚度、CFRP 最大应变、界面峰值剪应力以及界面断裂能会随着温度的升高而减小, 随着 CFRP 布宽度的增加而增大。

(2) 在已有模型的基础上, 引入温度修正系数, 建立高温后 CFRP-MOC-混凝土界面有效粘结长度模型和承载力计算模型, 弥补了之前众多模型没有考虑温度的这一缺失, 可以较好地预测高温环境下 CFRP-MOC-混凝土的界面承载力, 为高温环境下 CFRP 加固设计提供了依据。

## 参考文献

[1] AL-SAADIN N, MOHAMMED A, AL-MAHAIDI R, et al. A state-of-the-art review: near-surface mounted FRP composites for reinforced concrete structures [J]. Construction and building materials, 2019, 209: 748 - 769.

[2] 黄丽华, 王文广, 陈健. U 型锚固对 BFRP 加固混凝土梁作用效果研究 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 385 - 394. (HUANG Lihua, WANG Wenguang, CHEN Jian. Study on effect of U anchorages on concrete beams reinforced by BFRP [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(3): 385 - 394.)

[3] 董坤, 郝建文, 李鹏, 等. 环境温差下 FRP-混凝土界面粘结行为分析 [J]. 工程力学, 2020, 37(11): 117 - 126. (DONG Kun, HAO Jianwen, LI Peng, et al. Studies on the bond performance of FRP-to-concrete interfaces under environmental temperature difference [J]. Engineering mechanics, 2020, 37(11): 117 - 126.)

[4] 陈忠范, 万黎黎, 李建龙, 等. 无机胶粘贴纤维布加固钢筋混凝土梁高温性能试验研究 [J].

- 四川建筑科学研究,2007(增刊1):169-173.  
(CHEN Zhongfan, WAN Lili, LI Jianlong, et al. Experiment study on behaviors of RC beams strengthened with inorganic adhesive sticked FRP sheets at elevated temperature [J]. Sichuan building science, 2007(S1): 169-173.)
- [5] 张国强. 无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土板高温性能的试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2011.  
(ZHANG Guoqiang. Experimental study on high temperature behavior of RC slabs strengthened with carbon fiber reinforced polymer by inorganic adhesive [D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2011.)
- [6] 徐明, 韩春雷, 陈忠范. 氯氧镁胶凝材料粘结碳纤维板高温后拉伸性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(3): 18-21.  
(XU Ming, HAN Chunlei, CHEN Zhongfan. Experimental study on tensile strength of CFRP plate bonded with MOC after high temperature [J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2013(3): 18-21.)
- [7] FU F. Residual stress-strain relationship of scoria aggregate concrete with the addition of PP fiber after fire exposure [J]. Fire, 2021, 4(4): 91.
- [8] 寇立亚, 殷昌永, 朱学佳. 高温后普通混凝土材料复杂力学特性[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(1): 30-35.  
(KOU Liya, YIN Changyong, ZHU Xuejia. Analysis of the complex mechanics behavior of concrete after high temperature [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2013, 29(1): 30-35.)
- [9] TANG C W. Residual mechanical properties of fiber-reinforced lightweight aggregate concrete after exposure to elevated temperatures [J]. Applied sciences, 2020, 10(10): 3519.
- [10] 胡克旭, 卢凡, 蔡正华. 高温下碳纤维-混凝土界面受剪性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(12): 1592-1597.  
(HU Kexu, LU Fan, CAI Zhenghua. Researches on mechanical property of CFRP-concrete interface at elevated temperatures [J]. Journal of tongji university(natural science), 2009, 37(12): 1592-1597.)
- [11] MALI-AHMAD M. Debonding of FRP from concrete in strengthening applications: experimental investigation and theoretical validation [D]. New York: City University of New York, 2005.
- [12] 刘生纬. 硫酸盐环境下 CFRP-混凝土界面粘结性能退化规律及劣化机理研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.  
(LIU Shengwei. Research on degradation law and mechanism of CFRP sheet-concrete interfacial bonding performance under sulfate environment [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.)
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部. 纤维增强复合材料加固修复钢结构技术规程: YB/T 4558—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
(Ministry of Industry and Information Technology. Technical specification for strengthening steel structures with fiber reinforced polymer: YB/T 4558—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.)
- [14] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.  
(LU Xinzhen. Studies on FRP-concrete interface [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.)
- [15] SATO Y, ASANO Y, UEDA T. Fundamental study on bond mechanism of carbon fiber sheet [J]. Proceedings of the Japan society of civil engineers, 2010, 648(648): 71-87.
- [16] SERBESCU A, GUADAGNINI M, PILAKOUTAS K. Standardised double-shear test for determining bond of FRP to concrete and corresponding model development [J]. Composites part b: engineering, 2013, 55: 277-297.
- [17] KHALIFA A, GOLD W J, NANNI A, et al. Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members [J]. Journal of composites for construction, 1998, 2(4): 195-202.
- [18] CHEN J F, TENG J G. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete [J]. Journal of structural engineering, 2001, 127(7): 784-791.  
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)