

高温下碳纤维-混凝土界面受剪性能试验研究

胡克旭, 卢 凡, 蔡正华

(同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

摘要: 分别在 4, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 °C 下进行碳纤维-混凝土界面的剪切试验, 研究了不同温度下界面破坏形式、温度对胶体及碳纤维的影响, 以及黏结强度随温度的变化规律, 初步建立了不同温度下的黏结应力-位移关系. 试验结果表明, 40 °C 时的界面黏结强度高于其他温度; 40 °C 后黏结强度随温度升高而降低; 温度超过 100 °C 后, 黏结强度基本趋于稳定.

关键词: 混凝土; 碳纤维; 高温; 界面黏结强度; 剪切试验
中图分类号: TU 377.9 **文献标识码:** A

Researches on Mechanical Property of CFRP-concrete Interface at Elevated Temperatures

HU Kexu, LU Fan, CAI Zhenghua

(Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The shear tests of CFRP-Concrete interface specimens were executed at different temperatures, 4, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 °C, to investigate the changing regulation of the interface strength with temperature, the failure type and the influence of the temperature on the adhesive and carbon fiber reinforced polymer (CFRP). The relationship between the bond stress and slip was preliminarily established at different temperatures. The test results show that the interface bond strength at 40 °C is the maximum, and the interface strength decreases when the temperature is over 40 °C, and then remains stable when the temperature is over 100 °C.

Key words: concrete; carbon fiber reinforced polymer; elevated temperature; interface bond strength; shear test

碳纤维增强聚合物 (carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 是一种轻质、高强复合材料, 由于其操作性好和耐腐蚀等诸多优点, 近年来被广泛应用于混凝土结构加固中. 通常在常温下, 只要施工质量

达到要求, 现有 CFRP 胶黏剂的黏结性能能够保证 CFRP 与混凝土的共同工作. 然而在火灾中, CFRP 加固梁的耐火性能却很不理想: 一方面, CFRP 在火灾下容易氧化, 导致其强度大幅降低; 另一方面, 黏贴 CFRP 所用的胶黏剂非常怕火, 温度超过 60 °C 强度开始明显下降, 到 120 °C 几乎全部丧失强度^[1]. 根据 CFRP 加固混凝土结构的耐火试验, 粘贴在混凝土表面的 CFRP 在失去防火保护后极易燃烧殆尽^[2-3]. 无论是 CFRP 氧化还是胶层失效, 都意味着 CFRP 退出工作, 从而造成加固失效, 致使处于火灾危险下的加固结构更加危险.

近年来, CFRP 加固混凝土结构的抗火研究逐步受到重现, 国内外学者采取不同防火保护方法进行了 CFRP 加固混凝土梁、柱构件的耐火性能探索性研究. 然而, 目前研究多集中于 CFRP 加固钢筋混凝土构件的宏观耐火性能上, 还很少涉及抗火机理的深入研究. 高温下 CFRP-混凝土界面的受剪性能是研究 CFRP 加固混凝土结构抗火机理的基础. 常温下的 CFRP-混凝土界面性能已进行了较为深入的研究^[4-6], 而高温下的界面性能却研究很少, 仅有的研究成果主要针对黏结强度随温度的变化情况和温度对界面破坏形态的影响方面. 2000 年 Tadeu 和 Branco^[7]进行了 20~120 °C 钢板与混凝土间的黏结强度研究, 2001 年 Tommaso 等人^[8]进行了 -100~40 °C 下不同弹性模量的 CFRP-混凝土间的黏结强度弯曲试验, 2003 年 Blontrock^[9]进行了 20~70 °C 下 CFRP-混凝土间的黏结强度研究, 2005 年 Klamer 等人^[10]对 CFRP-混凝土界面的黏结性能进行了 -10~75 °C 范围内的剪切和弯曲对比试验, 同时对 CFRP-混凝土界面上的应力和应变分布进行了测试分析.

根据前期研究成果^[2-3], 分别采用 50 mm 厚的防火涂料和 40 mm 厚的硅酸钙防火板保护的 CFRP 加固混凝土梁, 火灾中 CFRP 胶黏层的温度均超过 120 °C. 而目前对高温下的 CFRP-混凝土界面性能研究的

试验温度不超过 80 ℃,且尚未涉及到界面黏结—滑移性能的研究.本文正是基于这一研究现状,开展高温下 CFRP-混凝土界面受剪性能的研究.为此,本文设计并进行了不同温度下一系列 CFRP-混凝土界面剪切试验,研究了在 4, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 ℃ 下的界面受剪性能,初步建立了不同温度下 CFRP-混凝土界面的黏结—滑移关系.

1 试验概况

1.1 试验试件

本次试验为双面剪切试验,试件如图 1 所示,每组试件由 1 号试块和 2 号试块组成,二者通过 CFRP 连接在一起.其中 1 号试块为锚固 CFRP 用,2 号试块为试验测试对象.2 块试块尺寸分别为:1 号试块 150 mm × 150 mm × 120 mm,2 号试块 150 mm ×

150 mm × 160 mm.在试块表面粘贴 100 mm 宽的 CFRP,有效黏结长度 120 mm.为实现炉外加载,在 1,2 号试块内都埋置 $\Phi 20$ 的螺纹钢筋 1 根,试验时荷载施加于钢筋端部,从而对试件进行加载.为防止钢筋与混凝土之间产生滑移,在钢筋两侧焊接 20 mm 长的 $\phi 6$ 短钢筋段以加强钢筋的锚固.为保证加载过程中 2 个试块轴心受拉,1,2 号试块在制作过程中作为整体浇筑,用同一根 $\Phi 20$ 钢筋,试件浇筑完成并自然养护 28 d 后,再将其切割开.另外,在 2 号试块的另一侧非剪切面局部粘贴 CFRP 布置热电偶,测试界面温度.

本次试件采用普通硅酸盐水泥混凝土,实测混凝土立方体抗压强度为 34.5 MPa. CFRP 材料采用新日本石油 HM300 型,名义厚度 0.165 mm,弹性模量 390 GPa,抗拉强度 2 900 MPa,粘贴 CFRP 使用其配套胶黏剂,包括底胶与面胶.

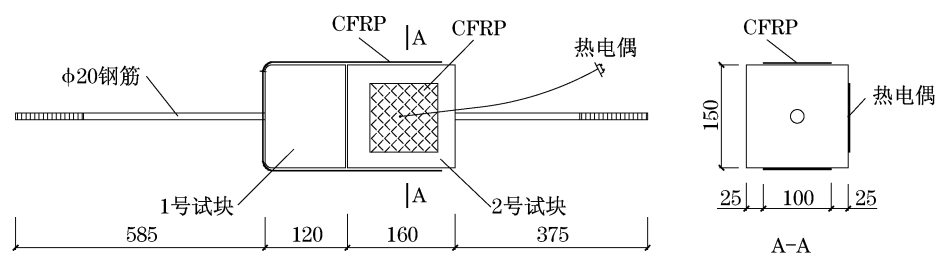


图 1 试件示意图(单位:mm)

Fig.1 Details for specimens(unit:mm)

1.2 试验装置和升温条件

试验装置如图 2 所示.使用高温试验炉对试件加热,炉膛尺寸为 300 mm × 300 mm × 350 mm,采用电热丝加热,温控精度为 1 ℃.试验温度分别为 4(室温),40,60,80,100,120,140,160,180 ℃.为减少受热时间的影响因素,试验时先将试验炉膛预热至试验温度,然后再安装试件并连接测温仪表,达到预定温度后恒温 5 min,再开始加载试验.

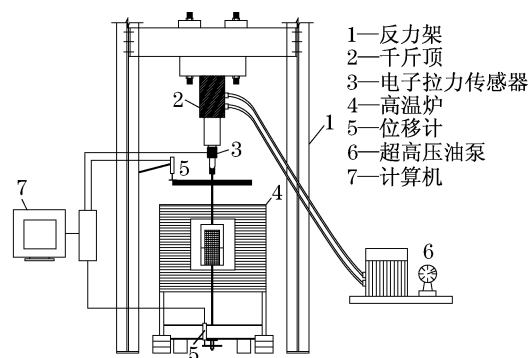


图 2 试验装置示意图

Fig.2 Test equipments

试验加载装置为力源 DYB-6308 液压式拉压千斤顶,额定拉力为 100 kN,额定压力为 300 kN,加载精度为 0.068 9 kN.试验时需要记录加载过程的荷载和 1,2 号试块的相对位移.荷载由电子拉力传感器输出,相对位移由安装于上下端钢筋夹具上的位移计测量(精度 0.005 mm).拉力传感器与位移计都与计算机相连,可实时采集试验数据,采集密度为 1 次 · s⁻¹.

2 试验现象及分析

本试验在 4,40,60,80,100,120,140 ℃ 下每档温度分别进行了 3 次试验.由于受到试件数量的限制,160 和 180 ℃ 这 2 档温度下各只进行了 1 次试验.

由于试验过程中试件位于炉内,无法观察其整个变化过程,且由于试验荷载较小,加载过程较短,也不宜分级间歇加载以观察试验现象.根据试验结束后的试件状态可见,破坏形式皆为 CFRP 沿界面整体剥离破坏,具体形式主要有以下 3 种:

(1) CFRP 沿胶层与混凝土界面的剥离破坏(a 型). 粘贴 CFRP 的底胶为透明色, 面胶为蓝色. 发生这一形态的剥离破坏时, 试块表面留有透明色胶层, 没有任何蓝色胶体残留痕迹, 而混凝土试块本身几乎没有破损的痕迹, 如图 3 所示.

(2) 试块表层混凝土随 CFRP 沿界面剥离(b 型). 在这一破坏形态中, 随胶层被一起剥离下来的混凝土大约有 1~3 mm 厚, 如图 4 所示. 在常温试验中, 这种破坏形式是最常见的.

(3) CFRP 沿胶层与 CFRP 界面的剥离破坏(c 型). 当发生这一形态的剥离破坏时, 胶层附着在混凝土试件表面而不随 CFRP 一起剥离, 如图 5 所示, 可以清楚地看到留在混凝土试件表面的蓝色胶层. 在这种情况下, CFRP 上浸渍的胶层随高温蒸发, 几乎没有残留, 如图 6 所示.



图 3 胶层与混凝土界面破坏(a 型)

Fig.3 Interfacial failure between glue and concrete (a-type)



图 4 表层混凝土剥离破坏(b 型)

Fig.4 Concrete stripping with CFRP(b-type)

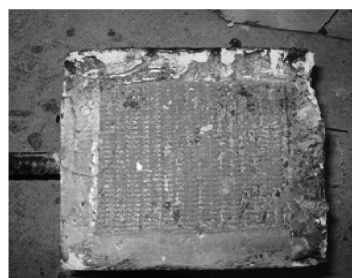


图 5 胶层与 CFRP 界面破坏(c 型)

Fig.5 Interfacial failure between glue and CFRP(c-type)

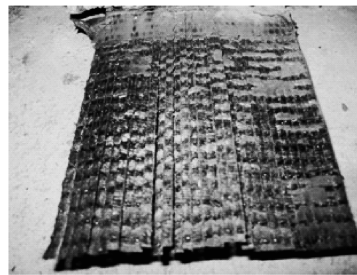


图 6 CFRP 上胶体蒸发殆尽(c 型)

Fig.6 Glue on CFRP disappearing for evaporation(c-type)

通过对试件破坏形式的分析发现, 温度对 CFRP 和胶体的影响十分明显: 60 °C 以上试验的试件, 胶体出现明显软化. 随着温度继续升高, 胶体开始转变为可流动的液体形态(图 7)并开始蒸发, 产生刺鼻的气味. 而 CFRP 在超过 100 °C 时, 还会出现氧化现象, 呈现出黑褐色烤焦状, 如图 8 所示.

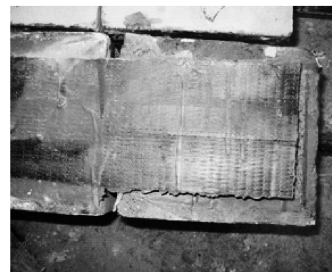


图 7 胶体呈流体形态

Fig.7 Glue in flow pattern

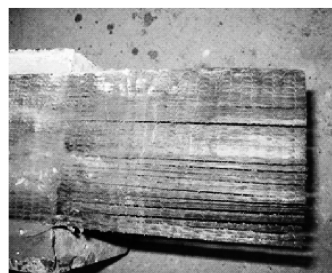


图 8 CFRP 高温氧化

Fig.8 CFRP's oxidation

表 1 是试验所得各试件的破坏形态和破坏荷载. 试验结果显示, 界面温度为 4 °C (室温) 和 40 °C 时, 胶体呈固体状态; 60, 80 °C 时胶体软化; 100 °C 以上, 胶体则呈现流塑性状态. 而且随着胶体形态的改变, 试件的破坏形式及 CFRP 氧化程度呈现出明显的规律性.

温度低于 100 °C 的情况下 CFRP 无明显氧化. 而当 100 °C 以上, 胶体开始呈现流体状态时, CFRP 开始出现氧化现象, 且温度越高氧化程度也越高. 这是因为 CFRP 表面的胶体由于高温流体化直至蒸发

后,CFRP 直接暴露于空气中产生的. 140 ℃ 以上由于 CFRP 上的胶体大量蒸发,CFRP 被直接从胶层上剥离开来,胶层则残留于混凝土表面,呈现出 c 型的破坏形态.

表 1 试验结果一览表

Tab.1 Test results

试件编号	剥离形式	胶层形态	CFRP 氧化程度	平均黏结强度/MPa
4 ℃ - 1	a 型	固态	无氧化	1.03
4 ℃ - 2	a 型	固态	无氧化	1.03
4 ℃ - 3	a 型	固态	无氧化	1.03
40 ℃ - 1	b 型	固态	无氧化	1.39
40 ℃ - 2	b 型	固态	无氧化	1.39
40 ℃ - 3	b 型	固态	无氧化	1.39
60 ℃ - 1	a 型	软化	无氧化	0.62
60 ℃ - 2	a 型	软化	无氧化	0.62
60 ℃ - 3	a 型	软化	无氧化	0.62
80 ℃ - 1	a 型	软化	无明显氧化	0.36
80 ℃ - 2	a 型	软化	无明显氧化	0.36
80 ℃ - 3	a 型	软化	无明显氧化	0.36
100 ℃ - 1	a 型	流塑态	轻微氧化	0.35
100 ℃ - 2	a 型	流塑态	轻微氧化	0.35
100 ℃ - 3	a 型	流塑态	轻微氧化	0.35
120 ℃ - 1	a 型	流塑态	轻微氧化	0.36
120 ℃ - 2	a 型	流塑态	轻微氧化	0.36
120 ℃ - 3	a 型	流塑态	轻微氧化	0.36
140 ℃ - 1	c 型	蒸发	明显氧化	0.36
140 ℃ - 2	c 型	蒸发	明显氧化	0.36
140 ℃ - 3	c 型	蒸发	明显氧化	0.36
160 ℃ - 1	c 型	蒸发	明显氧化	0.34
180 ℃ - 2	c 型	蒸发	明显氧化	0.35

3 试验结果及分析

3.1 高温下 CFRP-混凝土界面平均黏结应力—滑移关系

试验中记录了不同温度下的荷载—位移关系曲线,得到了各试验温度下试件的破坏荷载及其对应的界面相对滑移量 δ . 将荷载除以黏结面积即可得到平均黏结应力 $\bar{\tau}$,由此得到的 $\bar{\tau}-\delta$ 曲线如图 9—15 所示.

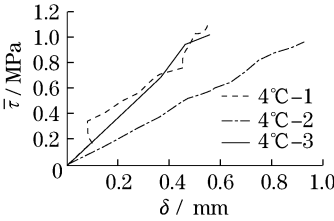


图 9 4 ℃ 时 $\bar{\tau}-\delta$ 曲线

Fig.9 $\bar{\tau}-\delta$ curves at 4 ℃

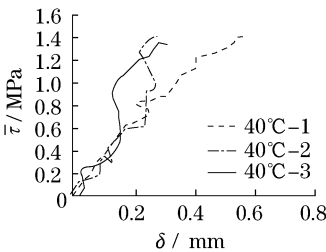


图 10 40 ℃ 时 $\bar{\tau}-\delta$ 曲线

Fig.10 $\bar{\tau}-\delta$ curves at 40 ℃

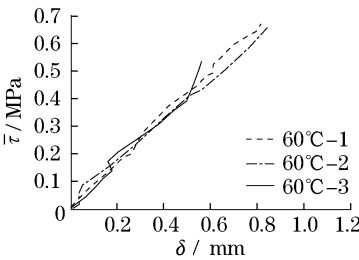


图 11 60 ℃ 时 $\bar{\tau}-\delta$ 曲线

Fig.11 $\bar{\tau}-\delta$ curves at 60 ℃

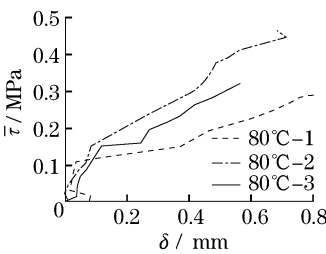


图 12 80 ℃ 时 $\bar{\tau}-\delta$ 曲线

Fig.12 $\bar{\tau}-\delta$ curves at 80 ℃

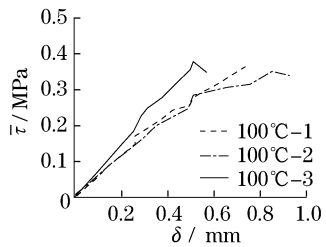


图 13 100 ℃ 时 $\bar{\tau}-\delta$ 曲线

Fig.13 $\bar{\tau}-\delta$ curves at 100 ℃

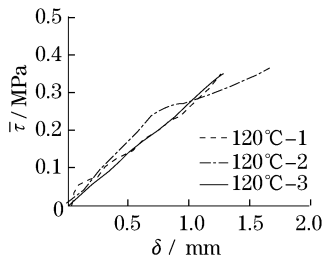
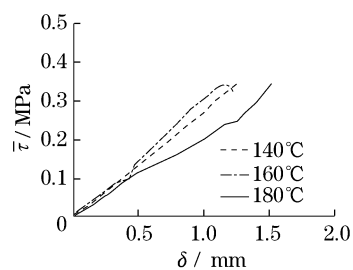


图 14 120 ℃ 时 $\bar{\tau}-\delta$ 曲线

Fig.14 $\bar{\tau}-\delta$ curves at 120 ℃

图15 140,160,180℃时 $\bar{\tau}$ — δ 曲线Fig.15 $\bar{\tau}$ — δ curves at 140,160,180℃

3.2 高温下CFRP-混凝土界面黏结强度—温度关系

本次试验中,从4℃至140℃的各档温度下分别进行了3个试件试验,而在温度为160和180℃下各进行了1个试件试验.各档温度下的界面平均黏结强度随温度的变化关系如图16所示.结果表明,随温度的升高,平均黏结强度总体呈下降趋势,但在40℃左右有一明显的上升过程,而超过100℃后平均黏结强度随温度变化不大.平均黏结强度在40℃左右相对提高的现象在其他学者的试验中也已得到证实^[9].笔者认为,这主要是由于胶层的胶着力变化所致:温度不高时,随着胶体的软化,黏性提高,胶体的黏结强度会随之增强.

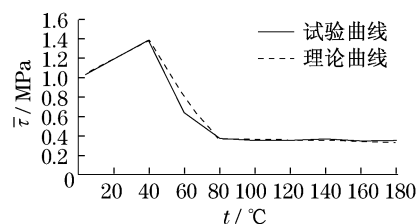


图16 平均黏结强度随温度变化趋势

Fig.16 Average bond strength changing with temperatures

根据图16的试验结果,60℃时黏结强度的降低已经相当明显,胶体也出现明显软化,可以把60℃作为本试验所用胶体的玻璃化温度.而试验温度超过100℃后,界面平均黏结强度基本趋于稳定.尤其是当温度达到140℃后,尽管胶体大量蒸发,但并没有导致黏结强度进一步降低,这可能与试验加载装置和测试精度有关,有待进一步研究.

3.3 高温下CFRP-混凝土界面滑移量—温度关系

图17显示了极限荷载时的界面相对滑移量随温度变化的关系.随着温度的升高,胶体由固态逐渐软化黏塑性状态,再由黏塑性状态转化为流塑性状态.伴随这一过程,界面剪切刚度不断下降,而相

应的变形能力则不断增大.但在整个试验过程中,极限滑移量随温度几乎是波浪式上升,具体规律有待进一步研究.

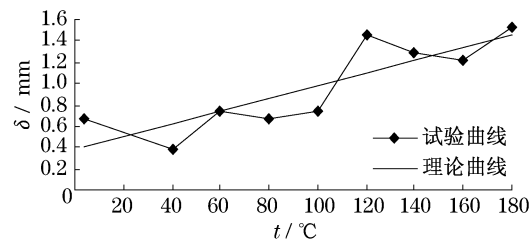


图17 滑移—温度关系图

Fig.17 Slip—temperatures relationship

4 高温下CFRP-混凝土界面受剪性能理论模型

4.1 高温下界面的黏结强度—温度关系

根据图16反映的CFRP-混凝土界面平均黏结强度随温度的变化规律,本文近似采用三折线模拟高温下CFRP-混凝土黏结强度与温度的关系,如下式:

$$\tau_t = \begin{cases} 0.01t + 0.99, & 0^\circ\text{C} \leq t < 40^\circ\text{C} \\ -0.0258t + 2.335, & 40^\circ\text{C} \leq t < 80^\circ\text{C} \\ 0.35, & 80^\circ\text{C} \leq t < 200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ_t 为不同温度下的黏结强度,MPa; t 为温度,℃.

4.2 高温下界面的局部黏结应力—滑移关系

图9—15给出的平均黏结应力—滑移曲线直接反映了试验过程中的荷载—位移关系.本文采用ABAQUS有限元分析软件对试件加载过程进行分析,通过假定不同的局部黏结应力—滑移(τ — δ)模型分析发现,采用线性的 τ — δ 模型能很好地模拟试验曲线.因此提出高温下CFRP-混凝土界面的局部黏结应力—滑移关系如下式:

$$\tau = K_a \delta, \delta \leq \delta_t \quad (2)$$

式中, K_a 是随温度变化的系数,反映了不同温度下CFRP-混凝土界面的剪切刚度.根据本文试验结果, K_a 随温度变化可近似采用三折线模拟,如下式:

$$K_a = \begin{cases} 0.19t + 1.44, & 0^\circ\text{C} \leq t < 40^\circ\text{C} \\ -0.4005t + 25.24, & 40^\circ\text{C} \leq t < 60^\circ\text{C} \\ 0.44, & 60^\circ\text{C} \leq t < 200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

式(2)中, δ_t 为不同温度下CFRP-混凝土界面的极限滑移量,根据图17所得的试验结果近似取

$$\delta_t = 0.006t + 0.3796 \quad (4)$$

5 结论

试验研究表明,在本次试验的 4, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 °C 下,温度对于 CFRP-混凝土界面受剪性能的影响十分明显.胶体在温度升高的过程中逐渐软化,经历由固态—黏塑态—流塑态的转化过程.胶体进入流塑态后在高温下开始蒸发,导致 CFRP 氧化.但由于本次试验最高温度为 180 °C,CFRP 由于高温氧化导致的强度降低对最终破坏荷载大小的影响不大.

高温下胶体的软化直接影响界面黏结强度和剪切刚度.试验结果显示,在本次试验的温度下,40 °C 以上,随着温度升高,黏结强度降低,而界面剪切变形增大.但当温度上升至 100~180 °C 时,胶体在流塑状态下,界面黏结强度则基本趋于稳定.由于高温下 CFRP 表面大量胶体蒸发,致使破坏界面由胶层-混凝土界面变为胶层-CFRP 界面,但并未明显影响界面黏结强度.

本次试验设计的试件克服了高温下由于黏结强度降低导致的 CFRP 加载锚固困难的问题,为今后试验提供了手段.本文通过试验初步建立了高温下 CFRP-混凝土界面黏结强度—温度关系、局部黏结应力—滑移关系,为 CFRP 加固的钢筋混凝土结构抗火性能分析提供了理论模型.

参考文献:

- [1] 吴波,万志军. CFRP 布及胶粘剂的高温强度研究[C]//第三届全国钢结构防火及防腐技术研讨会暨第一届全国结构抗火学术交流会议论文集. 福州:福州大学土木工程学院,2005:386-394.
WU Bo, WAN Zhijun. Study on the strengths of CFRP and adhesive at elevated temperatures [C] // 3rd National Conference for Fire-resistance and Anti-corrosion of Steel Structures & 1st National

Conference on Structural Fire-resistance. Fuzhou: [s. n.], 2005:386-394.

- [2] 胡克旭,何桂生. CFRP 加固钢筋混凝土梁防火研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2006,34(11):1451.
HU Kexu, HE Guisheng. Experimental study on fire protection methods of CFRP strengthened reinforced concrete beams[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(11):1451.
- [3] 高皖杨. CFRP 加固钢筋混凝土梁耐火试验研究与理论分析[D]. 上海:同济大学结构工程与防灾研究所,2006.
GAO Wanyang. Researches on the fire performance of CFRP-strengthened reinforced concrete beams [D]. Shanghai: Tongji University. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, 2006.
- [4] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京:清华大学土木水利学院,2004.
LU Xinzhen. Studies on FRP-concrete interface [D]. Beijing: Tsinghua University. School of Civil Engineering, 2004.
- [5] 陆新征,谭壮,叶列平,等. FRP 布-混凝土界面黏结性能的有限元分析[J]. 工程力学,2004,21(6):45.
LU Xinzhen, TAN Zhuang, YIE Lieping, et al. Finite element analysis of debonding at the interface between FRP sheet and concrete[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(6):45.
- [6] 腾景光,陈建飞,史密斯 S T,等. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
TENG Jingguang, CHEN Jianfei, Smith S T, et al. FRP strengthened RC structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [7] Tadeu A J B, Branco F J F G. Shear tests of steel plates epoxy-bonded to concrete under temperature [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(1):74.
- [8] Di Tommaso A, Neubauer U, Pantuso A, et al. Behavior of adhesively bonded concrete-CFRP joints at low and high temperatures [J]. Mechanics of Composite Materials, 2001, 37(4):327.
- [9] Blontrock H. Analysis and modeling of the fire resistance of concrete elements strengthened with externally bonded FRPs[D]. Gent: Ghent University. Faculty of Engineering, 2003.
- [10] Klammer E L, Hordijk D A, Janssen H J M. SP-230-88 The influence of temperature on the debonding of externally bonded CFRP [S]. [2008-07-10]. <http://www.quakewrap.com/frp%20papers/>.