# 高温下 FRP 筋与混凝土的粘结性能

王晓璐<sup>1,2</sup>, 查晓雄<sup>1</sup>, 张旭琛<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院,518055 广东 深圳; 2. 深圳市建筑科学研究院有限公司, 518049 广东 深圳)

摘 要:为研究 FRP 筋与混凝土在高温下的粘结性能,对表面喷砂的 CFRP、BFRP 筋混凝土进行了高温下的拉拔试验, 得到 20~350 ℃温度范围内粘结强度及滑移曲线随温度的变化规律.试验结果表明,高温下 FRP 筋与混凝土粘结性能的 衰减集中出现在树脂的玻璃软化温度区间,结合材料热分析的试验结果,本文提出了 FRP 筋与混凝土的粘结强度随温 度的衰减模型,该模型以树脂玻璃化温度 T<sub>g</sub> 和热分解温度 T<sub>d</sub> 为控制参数,具有较强的通用性并可应用于其他树脂材料 和纤维类型的 FRP 筋中.高温中 FRP 筋与混凝土的粘结破坏模式为 FRP 主筋与喷砂层间的界面剥离破坏,根据高温下 二者粘结受力的特点,本文首次提出了高温中 FRP 筋与混凝土的四阶段粘结滑移模型,该模型以常温下的 CMR、mBEP 模型为原型,通过回归高温拉拔试验的变化规律以得到模型中的各项参数.经验证该滑移模型与常温及高温拉拔试验结 果具有较好的吻合性,可指导应用于 FRP 筋混凝土构件的抗火设计中.

关键词: FRP 筋;混凝土;高温;拉拔试验;粘结强度;滑移模型

中图分类号: TU377.9+1 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2013)06-0008-08

# Bond behavior of FRP rebar and concrete at elevated temperature

WANG Xiaolu<sup>1,2</sup>, ZHA Xiaoxiong<sup>1</sup>, ZHANG Xuchen<sup>1</sup>

Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, 518055 Shenzhen, Guangdong, China;
 Shenzhen Institute of Building Research, 518049 Shenzhen, Guangdong, China)

Abstract: Bond behavior of FRP rebars and concrete at elevated temperature are present in this paper. Commercially produced GFRP and BFRP rebars with sand coatings surface treatments were cast in concrete for the pullout tests, and the degradation of bond strength and bond-slip curve at the temperature ranging from 20 – 350  $^\circ$ C were obtained from the test. Experimental results indicated that the bond strength declined significantly during the glass transition temperature zones of epoxy resin, and a bond strength decay model at elevating temperature was proposed based on two controlled parameters of the glass transition temperature  $T_{\mu}$ and the decomposition temperature  $T_d$  of matrix. The model shown good agreement with our experimental results and other researchers, and the model is also suitable for FRP bars with different fiber types and matrix materials. The bond failure of pullout specimens at high temperature is caused by the deboning of FRP core section and sand coatings. Based on the bond performance, the paper proposes a four stage bond-slip theoretical constitutive relationship model for FRP rebar with sandcoating surface and concrete at high temperature. The  $\tau$  - s constitutive model at high temperature is based on the CMR and mBEP model, and the parameters in the model are proposed from the  $\tau$  - s test results. The bond-slip constitutive relationship model at elevate temperature can be used for the analysis of fire performance of FRP reinforced concrete members. Key words: FRP; concrete; high temperature; pullout test; bond strength; bond-slip constitutive relationship model

通信作者:查晓雄,zhaxx@hit.edu.cn.

纤维增强复合材料(FRP)以其轻质高强、耐腐蚀性好等优点,在土木工程领域有广阔的发展前景.FRP 是由连续纤维丝通过基体材料粘结而成,常用的基体材料为环氧树脂、乙烯基树脂等有

收稿日期: 2012-10-19.

基金项目:亚热带建筑科学国家重点实验室开放基金(2009KB20).

作者简介: 王晓璐(1982--), 女, 博士;

查晓雄(1968—),男,教授,博士生导师.

机高分子材料,其玻璃化温度仅为60~130℃<sup>[1]</sup>. 高温下树脂的软化与分解降低了对纤维丝的粘结 作用,导致 FRP 筋抗剪性能恶化,引发 FRP 筋表 面与混凝土之间粘结性能的急剧下降,严重影响 FRP 筋与混凝土共同工作的性能.目前国内外对 FRP 筋与混凝土的高温粘结性能的研究相对较 少<sup>[2-5]</sup>,本文通过49 根高温环境下 FRP 筋与混 凝土的拉拔试验,得到20~350℃温度范围内粘 结性能随温度的衰减规律;结合材料的热学性能, 提出了粘结强度随温度的衰减公式及高温下 FRP 筋与混凝土的粘结滑移本构模型,其成果可为 FRP 筋混凝土结构的耐火性能分析及设计提供试 验与理论基础.

1 试验概况

对工程中较为常用的表面喷砂形式的 FRP 筋与混凝土的粘结性能进行高温下的拉拔试验, 通过测量 FRP 筋与混凝土相对滑移量及粘结力 的变化,得到不同温度下 FRP 筋与混凝土的滑移 曲线.试验中使用两种不同类型的 FRP 筋(GFRP 玻璃纤维、BFRP 玄武岩纤维)、两种不同的筋截 面尺寸(#3、#4,直径 d 分别为 9.5、12.7 mm)、及 两种不同的混凝土保护层厚度(70、40 mm),在粘 结长度为 5d 的情况下测量 20~350 ℃不同温度 下 FRP 筋与混凝土的粘结性能,共 35 种工况,试 件总数为 49 根.

#### 1.1 试件的加工

FRP 筋采用中山浦美复合材料有限公司生产 的表面喷砂形式的商用 GFRP 筋和 BFRP 筋, FRP 筋的基体材料为环氧树脂,厂家提供的纤维质量 率为70%,GFRP筋的极限强度为820 MPa,BFRP 筋的极限强度为1150 MPa. 试验中使用无缝钢管 内添膨胀水泥的方式对 FRP 筋的受力端进行锚 固以防止拉力机夹具引起 FRP 筋的端部剪切破 坏<sup>[6]</sup>. FRP 筋与混凝土的粘结长度为 5d(d) FRP 筋直径),粘结部位位于试件的中部,非粘结部位 采用耐高温陶瓷管脱粘,通过在接头位置缠绕多 层四氟乙烯带来固定 FRP 筋与陶瓷管的相对位 置并防止砂浆进入陶瓷管内.使用 K 型热电偶绑 扎于粘结部位以测量加热过程中的真实温度,待 布置完成后于模板内浇筑混凝土,粘结部位的细 节见图1(a),混凝土浇筑前的构件布置见图1 (b). 为测量自由端的相对滑移量,将 FRP 筋底部 伸出混凝土外8 cm. 混凝土尺寸受加热炉大小影 响取为150 mm×150 mm×500 mm,采用425 标 准硅酸盐水泥、平均粒径 20 mm 的花岗岩碎石、

中砂 配 置, 配 合 比 为 水 : 水 泥 : 砂 : 石 = 200:440:597:1 213,实测 28 d 立方体抗压强度为 33.7 MPa,加工好的拉拔试件见图 1(c).



(c) 拉拔试件图1 拉拔试件的制作

#### 1.2 试验装置和设备

FRP 筋与混凝土的高温拉拔试验于中国矿业 大学建筑结构实验室完成<sup>[7]</sup>.采用对开式电加热炉 对混凝土中间区段进行加热,加热炉总高400 mm, 均匀加热区高200 mm,使用 K 型热电偶对炉温和 混凝土内粘结部位的温度进行测量并将温度采集 信号实时传送到温控装置,炉内升温速率可通过手 动调节温控箱上的电压以改变加热功率实现.拉拔 试验在电液伺服试验机上进行,通过钢反力架固定 FRP 筋混凝土拉拔试块.试验中使用自制的夹具将 差动式位移传感器 LVDT 绑扎于 FRP 筋上,以测量 FRP 筋与混凝土的加载端与自由端的相对滑移量. 位移、温度、荷载值通过 TDS303 数据采集系统进行 实时采集.试验设备见图 2.

#### 1.3 试验过程

试验前先将试块固定于钢反力架的上层空间,同时将对开式加热炉对扣在混凝土试块上并 卡紧,加热炉上下两端各有 190 mm×190 mm 的 空洞以便混凝土穿过,空隙位置使用硅酸铝石棉 填充以防止热量流失.加热过程中反力架顶层钢 板的上部螺栓不宜旋紧以免附加温度应力的产 生.试件安装完成后开始升温,炉内升温速度约保 持为5℃/min.待 FRP 筋与混凝土粘结部位的温 度达到目标值并恒温 40 min 后,旋紧反力架的顶 层钢板螺栓并绑扎位移传感器.启动电液伺服机 进行加载,加载速率为 0.2 mm/min,同时启动数 据采集装置,实时记录伺服机的拉力值、FRP 筋与 混凝土的相对滑移量、粘结部位的温度变化,以获 得恒定温度下 FRP 筋与混凝土的粘结滑移曲线.



(a)试验设备示意



(b)试验装置
 (c)位移传感器的连接
 图 2 试验装置及设备

2 高温拉拔试验结果

共进行了 49 根 FRP 筋混凝土试件在 20 ~ 350 ℃下的拉拔试验,试验结果表明,随着温度的 升高,FRP 筋与混凝土的粘结性能不断恶化.高温 下 FRP 筋与混凝土粘结破坏模式均为 FRP 主筋 与喷砂层之间的界面剥离破坏,FRP 基体材料环 氧树脂的软化是导致高温下粘结强度迅速降低及 该类破坏模式产生的直接原因.

#### 2.1 试验结果汇总

试验中考虑了不同纤维材料、直径、保护层厚 度对 FRP 筋混凝土高温粘结性能的影响,共分 5 组工况进行试验,试验结果见表 1.表 1 中的工况 编号为:公称直径(英尺) – FRP 筋种类 – 混凝土 保护层厚度, $\tau_{max,t}$ 为温度 t 时对应的高温粘结强 度, $\tau_{max,t_0}$ 为常温下的粘结强度, $s_{1,t}$ 为最大粘结力 对应的峰值滑移量, $\tau_{umax,t}$ 为高温粘结强度的平均 值.由试验数据可知,FRP 筋与混凝土的粘结强 度随温度的升高而不断减小,200 ℃ 后粘结强度 仅为常温下的 15%,可认为该温度下 FRP 筋与混 凝土间的粘结作用完全丧失.此外,随温度升高, 最大粘结力对应的峰值滑移量也不断减小.

表1 FRP	的混凝土拉拔试验结果汇总
--------	--------------

工况	t∕°C	编号	$ au_{\max \neq}$ /MPa	$S_{1\mu}$ /mm	$ au_{umax,t}/MPa$	$( au_{\max,t}/ au_{\max,t_0})/\%$
	20	20-1	18.3	0.7		
		20-2	17.5	1.3	19.1	100.0
		20-3	21.6	1.1		
		60-1	17.3	0.3		
	60	60-2	20.9	0.4	18.9	98.9
		60-3	18.5	0.7		
		80-1	16.0	0.6		
	80	80-2	15.2	0.7	16.0	83.7
#3-G-70	80	80-3	16.8	0.6	10.0	05.7
		100.1	0.5	0.5		
	100	100-1	8.5 10.7	0.3	0.4	40.2
		100-2	10.7	0.4	9.4	49.2
		100-3	9.0	0.4	5.3	
	120	120-1	5.3	0.2		27.9
		120-2	5.4	0.2		
	150	150-1	3.4	0.1		
		150-2	3.9	0.1	3.9	20.2
		150-3	4.3	0.2		
	180	180-1	2.9	0.1	2.9	15.4
	200	200-1	2.9	0.1	2.9	15.0
	250	250-1	1.5	0.1	1.5	7.6
		300-1	1.5	0.1		
	300	300-2	1.7	_	1.6	8.3
	350	350-1	0.5	-	0.5	2.6
	20	20-1	18.9	0.9	18.9	100.0
#3-B-70	60	60-1	17.6	0.5	17.6	92.9
	80	80-1	13.9	0.5		
		80-2	14.2	0.5	14.1	74.4
	100	100-1	8.0	0.3	8.0	42.4
	120	120-1	3.1	0.1		16.4
		120-2	3.1	0.2	3.1	16.4
	150	150-1	2.6	0.1	2.6	13.9
	180	180-1	2.1	0.1	2.1	11.3
	200	200-1	2.3	0.1	2.3	12.0
#3-G-40	20	20.1	21.5	0.6	21.5	100.0
	80	20-1 80-1	15.3	0.0	15.3	71.1
	100	100-1	6.2	0.4	6.2	29.0
	120	120-1	3.8	0.2	3.8	17.6
	180	180-1	3.4	0.1	3.4	15.8
#4-G-70	20	20-1	19.0	0.5	19.0	100.0
	80	80-1	15.9	0.4	15.9	83.7
	120	120-1	6.4	0.3	6.4	33.7
	150	150-1	4.4	0.2	4.4	23.1
	200	200-1	3.0	0.1	3.0	16.0
#4-B-40	20	20-1	17.7	0.8	17.7	100.0
	80	80-1	13.0	0.4	13.0	73.7
	100	100-1	7.0	0.3	7.0	39.4
	120	120-1	3.4	0.2	3.4	19.2
	150	150-1	2.9	0.1	2.9	16.5
	200	200-1	2.0	0.1	2.0	11.5

#### 2.2 粘结强度随温度的变化规律

5 种不同工况下 FRP 筋与混凝土粘结强度随 温度的衰减规律见图 3. 不同工况下 FRP 筋与混 凝土的粘结强度随温度的变化规律基本相同,粘 结性能的衰减集中出现在 60~120 ℃的温度区 间,该温度区间对应环氧树脂的玻璃化软化温度, 因此,作为胶粘材料的基体的热学性能对 FRP 筋 与混凝土的高温粘结性能起着决定作用.60 ℃前 环氧树脂尚未达到玻璃化温度,粘结强度基本没 有衰减;60~120 ℃间为树脂的玻璃软化区间, FRP 筋自身抗剪性能的下降导致 FRP 筋与混凝 土粘结性能的急剧降低;120 ℃后,树脂几乎完全 软化,FRP 筋与混凝土的粘结性能恶化严重.



图 3 粘结强度随温度的衰减

比较不同纤维种类的 GFRP 和 BFRP 筋与混 凝土的粘结性能可知, BFRP 筋的粘结强度较 GFRP 筋略小但总体差异不大,该差异产生的主 要原因是不同批次生产的 GFRP 筋表面喷砂颗粒 较 BFRP 筋表面颗粒密集造成的.因此,纤维丝的 种类不会对高温粘结强度有较大的影响,而筋表 面的粗糙程度对粘结性能有所影响.保护层厚度 为70 mm 试件的粘结强度略高于40 mm 的试件, 这是由于 FRP 筋与混凝土膨胀系数的差异导致 了混凝土产生微小的受拉裂缝而降低了二者间的 粘结性能.直径 9.5 mm 和 12.7 mm 的 GFRP 筋 与混凝土的粘结强度差异较小.

#### 2.3 高温粘结破坏形态

常温下 FRP 筋与混凝土粘结破坏模式主要有 3 种,混凝土的纵向劈裂破坏<sup>[8]</sup>;FRP 筋与混凝土 间的界面剪切破坏;FRP 筋内部的界面剪切破坏. 由于试验所用混凝土的保护层厚度较大,试验中未 出现混凝土的劈裂破坏,粘结破坏主要发生于 FRP 筋喷砂层与混凝土之间以及 FRP 筋主筋与喷砂层 之间.常温下的粘结破坏模式见图 4(a).国内学者 研究表明,FRP 筋的表面硬度和抗剪强度略低于混 凝土,粘结破坏一般以 FRP 筋表面肋被削弱或剪 切破坏为主<sup>[8-9]</sup>,由于本试验所用的混凝土标号适 中且 FRP 筋制作工艺较好,FRP 筋内部的胶粘力 和筋表面喷砂层与混凝土间的粘结力相当,故两种 破坏模式在常温下同时出现.

随着温度的升高,环氧树脂在60℃后由玻璃态进入橡胶态,FRP内部主筋与喷砂层间的抗剪性能急剧降低,因此高温下粘结破坏的形式均为

FRP 主筋与喷砂层间的界面剥离破坏. 图4(b)为 80 ℃时的粘结破坏形式, FRP 筋表面的喷砂层与 主筋脱离, 剥离后的 FRP 筋纤维丝表面光滑具有 光泽. 150 ℃时环氧树脂完全软化丧失了对纤维 丝的粘结能力, 该温度下由基体材料性能决定的 FRP 筋抗压、抗剪、抗扭能力几乎完全消失, 此时 FRP 筋轻易就能被折断, 纤维丝表面变得粗糙, 见 图4(c). 随着温度的升高, GFRP 筋的颜色逐渐变 深, 250 ℃时变为棕黄色, 350 ℃时, 环氧树脂开始 分解, 玻璃纤维束变为深棕色的分散状, FRP 筋完 全破坏, 见图4(d), (e). BFRP 筋的粘结破坏模 式见图4(f).



(a) 20 °C (b) 80 °C (c) 150 °C (d) 250 °C (e) 350 °C (f) BFRP

图 4 粘结破坏形态

# 2.4 高温粘结滑移曲线

高温下 FRP 筋与混凝土的粘结滑移曲线见 图 5, τ 为粘结应力, s 为实测的自由端滑移量.粘 结强度随温度的升高不断减小, FRP 筋自由端开 始出现滑移时对应的粘结力变小,粘结强度对应 的峰值滑移量也不断减小.



图 5 高温下的  $\tau-s$  滑移曲线

FRP 筋与混凝土的粘结力主要由化学胶粘 力、摩擦力、机械咬合力提供<sup>[10]</sup>,常温下 FRP 筋 与混凝土的粘结滑移曲线可分 5 个阶段:(1)微 滑移阶段,该阶段的粘结力主要由化学胶粘力提 供,FRP 筋自由端尚未发生滑移.(2)滑移阶段, 当粘结强度达到 14 MPa(约为 0.75 $\tau_{max}$ )时,FRP 筋自由端开始滑移, $\tau - s$ 曲线呈非线性上升,此 阶段化学胶粘力逐渐消失,FRP 筋表面砂粒与混 凝土间的摩阻力及机械咬合力对粘结性能起着主 要作用.(3)平滑阶段,当自由端滑移量达到 0.7 mm时粘结力达到峰值,此后粘结力变化较为 平缓,出现平滑阶段,直至滑移量为2 mm 左右. 该阶段 FRP 筋表面粘砂层逐渐脱落或研磨成粉 状,降低了混凝土的粘结性能,同时 FRP 筋内部 主筋与喷砂层间的剪切应力逐渐增大,加快了 FRP 筋内部剥离现象的产生.(4)下降段,FRP 筋 表面砂粒与外部混凝土和内部主筋发生剪切破坏 后,摩擦力和机械咬合力逐渐削弱和衰减,τ-s 曲线出现了下降段.(5)残余段,当粘结力下降到 一定数值时与拉拔力平衡,维持一个相对稳定的 平衡状态,此时粘结力主要由滑动摩阻力提供.

高温下 FRP 筋与混凝土的粘结性能衰减严 重,随着树脂的软化,FRP内部主筋与喷砂层间的 胶粘力成为影响高温粘结性能的主要因素.高温 下的滑移曲线可分5个阶段:(1)微滑移阶段. (2) 滑移阶段, 高温粘结性能的前两个阶段变化 特点与常温近似.(3)剥离阶段,当粘结力达到峰 值时 FRP 筋自身发生界面剥离破坏, FRP 主筋直 接被拔出而导致粘结性能瞬间降低,降低幅度可 达20% 左右. (4) 下降/平缓段, FRP 筋剥离后其 化学胶粘力和机械咬合力基本消失,下降段的粘 结力主要由 FRP 主筋与喷砂层间的滑动摩阻力 提供.试验结果表明,当未到达树脂软化温度时, 滑移曲线缓慢下降至残余粘结力,当温度超过树 脂玻璃化温度后,滑移曲线变化平缓甚至略有上 升,该阶段粘结力的增大可认为是 FRP 筋高温膨 胀增大了与混凝土间的环向压力而使摩阻力有所 提高而致.(5)残余段,FRP 筋主筋与喷砂层内表 面的滑动摩阻力与拉拔力平衡,构件处于相对稳 定的平衡状态.

3 高温下粘结强度的折减公式

#### 3.1 高温粘结强度折减公式的提出

由 FRP 筋与混凝土最大粘结力随温度的衰减规律可知,环氧树脂在未发生玻璃软化前的粘结力降低幅度较小,粘结力的显著下降集中出现 在树脂的软化阶段,树脂完全软化后的粘结力变 化较小,直至树脂分解后完全丧失粘结性能.粘 结强度随温度的折减公式可由 3 个温度点控制: 室内环境温度 t<sub>0</sub>,树脂玻璃化温度 T<sub>g</sub>,树脂的热分 解温度 T<sub>d</sub>,经分析, FRP 与混凝土的粘结强度随 温度的折减公式可表示为

$$\boldsymbol{\tau}_{\max, t} = \boldsymbol{\tau}_{\max, t_0} \times K_{\tau_{\max}}, \qquad (1)$$

 $K_{\tau_{\text{max}}} = k_1 \times e^{-(\frac{t-t_0}{T_g})^4} + k_2 \times e^{-(\frac{t-t_0}{T_d})^4}.$  (2) 式中:  $\tau_{\text{max},t}$  为温度 t 时的粘结强度;  $\tau_{\text{max},t_0}$  为常温 下的粘结强度;  $K_{\tau_{\text{max}}}$  为高温下粘结强度折减系数;  $t_0$  为室内环境温度可取值为 20 °C;  $T_g$  为树脂玻璃 化温度, 单位为 °C;  $T_d$  为树脂热分解温度, 单位为 °C;  $k_1$  和  $k_2$  为与 FRP 筋表面形式有关的系数.

试验所用的 FRP 筋基体材料为环氧树脂,常 温固化成型,本文对材料进行了 DSC/TG 热分析 试验,试验测得树脂的玻璃化温度  $T_g = 88 \, \degree$ ,热 分解温度  $T_d = 325 \, \degree$ . FRP 筋混凝土的粘结性能 与 FRP 筋表面形式有关,本文试验结果表明不同 纤维材料、直径、混凝土保护层厚度对粘结强度的 影响较小,故本文用统一公式给出.对于表面喷砂 形式的 FRP 筋与混凝土的粘结性能,可取系数  $k_1 = 0.9, k_2 = 0.1$ ,本实验的高温粘结强度折减 系数为

 $K_{\tau_{\rm max}} = 0.9 \times e^{-(\frac{t-20}{88})^4} + 0.1 \times e^{-(\frac{t-20}{325})^4}.$  (3)

使用式(3)计算的 FRP 筋与混凝土高温粘结 强度的折减系数与实测数据的对比见图 6,理论 公式与试验结果吻合很好.





#### 3.2 与国内外试验结果的对比

本文提出的 FRP 筋与混凝土的高温粘结强 度折减公式与国内外高温试验结果的对比见 图 7,粘结强度随温度的衰减规律在各组试验中 具有相同的趋势.由于不同学者所用树脂的热学 性能各有差异,故各组实验数据存在一定的离散 性,总体来说折减公式与试验结果吻合较好.





4 高温下 FRP 筋混凝土粘结滑移模型

## 4.1 常温下 FRP 筋与混凝土的滑移模型

CMR 模型是基于 FRP 筋混凝土的粘结性能 提出的,对 $\tau - s$ 曲线的上升段进行了较为精确的 模拟<sup>[12]</sup>,BEP 模型是基于钢筋混凝土的滑移性能 提出的 $\tau - s$ 全过程曲线<sup>[13]</sup>,已被规范 CEB-FIP 1990 采用<sup>[14]</sup>,mBEP 模型对 BEP 模型的水平段及 软化段进行了改进<sup>[15]</sup>.本文研究的表面喷砂 FRP 筋与混凝土的滑移模型可在 CMR 模型和 mBEP 模型基础上进行改进.

4.1.1 滑移模型参数取值

## 4.1.1.1 CMR 模型

式(4)为 CMR 模型的表达式,参数 s, 和 $\beta$ 可 根据试验结果进行回归. 根据本文的试验结果,建 议对表面喷砂形式的 FRP 筋与混凝土的滑移模 型参数取值为  $s_r = 1/4 \sim 1/6$ , $\beta = 0.35 \sim 0.45$ . 本文所用参数取值为  $s_r = 1/4$ , $\beta = 0.4$ .

$$\tau = \tau_{\max} (1 - e^{-\frac{s}{s_r}})^{\beta}.$$
 (4)

4.1.1.2 BEP 模型

式(5)为 BEP 模型表达式,其中  $s_1$ 为  $\tau_{max}$  对 应的峰值滑移量. 该模型是根据钢筋与混凝土的 滑移性能提出的,由于带肋钢筋的表面刚度较大, 破坏模式通常为混凝土的局部压碎或劈裂破坏. 而 FRP 筋由于其表面刚度和抗剪强度低于普通 混凝土,粘结破坏模式常以表面砂粒压碎滑落或 界面剥离破坏为主. CEB – FIP 1990 中推荐钢筋 混凝土滑移模型的上升段滑移系数  $\alpha$ 取 0.4,根 据本试验结果,推荐 FRP 筋混凝土粘结滑移系数  $\alpha$ 取 0.2.

$$\tau = \tau_{\max} \times \left(\frac{s_1}{s}\right)^{\alpha}.$$
 (5)

## 4.1.1.3 mBEP 模型

mBEP 模型的上升段与 BEP 模型相同,但认 为 FRP 筋与混凝土的粘结性能较钢筋混凝土差 而不会在峰值点  $\tau_{max}$  处出现平滑段,mBEP 模型 软化阶段的方程如式(6)所示,曲线下降段的斜 率可表示为  $k = -p \cdot \tau_{max}/s_1$ . BEP 和 mBEP 滑移 模型认为软化阶段后的粘结力保持恒定,即  $\tau_u = q \cdot \tau_{max}$ .根据本文试验结果,表面喷砂形式 FRP 筋与混凝土下降段的粘结参数可取为 p = 0.14, 残余阶段的系数 q 偏于保守的取低值 0.3.

$$\frac{\tau}{\tau_{\max}} = 1 - p\left(\frac{s}{s_1} - 1\right). \tag{6}$$

4.1.2 常温下的 *τ* - *s* 滑移模型

CMR 模型及 BEP 模型与试验所测滑移曲线

的上升段均吻合较好,CMR 模型的表达式在达到  $\tau_{max}$ 后曲线变化平缓,而 BEP 模型的表达式在达 到 $\tau_{max}$ 后继续上升,故本文推荐使用 CMR 模型作 为常温和高温下 FRP 筋混凝土  $\tau - s$  曲线的上升 段模型,使用 mBEP 模型的软化段作为 $\tau - s$  曲线 的下降段模型,本文建议采用的常温下 $\tau - s$ 本构 模型见式(7).

$$\tau = \begin{cases} \tau_{\max} (1 - e^{-\frac{s}{s_{\tau}}})^{\beta}, & s \leq s_{1}; \\ \tau_{\max} \Big[ 1 - p \Big( \frac{s}{s_{1}} - 1 \Big) \Big], & s_{1} \leq s \leq s_{2}; \\ q \cdot \tau_{\max}, & s_{2} \leq s. \end{cases}$$
(7)

常温试验中大部分试件的滑移曲线在 $\tau_{max}$ 附近出现了明显的平滑段,对应的峰值滑移量 $s_1$ 达到了2.0 mm,说明本试验所用FRP筋自身抗剪能力及筋与混凝土的粘结较好.少量试件(如保护层厚度为40 mm)的 $\tau - s$ 曲线没有出现平滑段,在自由端滑移量为0.7 mm时开始下降,故 $s_1$ 可根据粘结情况的不同分别取值为2.0或0.7 mm.常温下的滑移模型共5个参数,本文取值分别为 $s_r = 1/4, \beta = 0.4, p = 0.14, q = 0.3, s_1 = 2.0(0.7)$ . 滑移模型与试验的对比见图8,可见 $\tau - s$ 模型与试验结果吻合较好.



## 4.2 高温下 FRP 筋与混凝土的滑移模型

由试验结果可知,高温下树脂的软化导致 FRP 主筋与喷砂层间发生了剥离破坏, τ - s 曲线 达到峰值点后粘结力陡然下降,随后下降平缓直 至达到新的平衡.本文在考虑高温下的 FRP 筋与 混凝土粘结滑移模型中偏保守地认为粘结破坏模 式均发生 FRP 筋内部的剥离破坏,即常温下峰值 粘结力对应的滑移量取值为 s<sub>1</sub> = 0.7 mm.

本文首次提出 FRP 筋与混凝土在高温下的 滑移模型,模型将 τ - s 曲线分为4 个区段:上升 段、剥离段、软化段、残余段,模型示意见图9,具 体表达式见式(8).

高温下 FRP 筋与混凝土的  $\tau - s$  理论本构模型

共有 8 个独立参数,根据本文 49 根高温拉拔试验 结果进行拟合,各参数的表达式可表示为式(9) ~ (16)的形式,参数拟合结果与试验结果的对比见图 10,其中剥离段斜率参数  $p_{1,i}$ 偏于安全取大值,残余 段参数  $\tau_{u,i}/\tau_{max,i}$  偏于安全的取小值.



#### 图 10 高温滑移模型各参数的拟合

高温下 FRP 筋混凝土理论滑移模型与试验 结果的对比见图 11(a), τ - s 曲线上升段的对比 见图 11(b),本文提出的高温滑移模型具有较高 的精度.且该滑移模型是基于材料热学性能提出 的,适用于树脂软化引起的 FRP 筋自身剥离的粘 结破坏模式,可推广应用于同破坏模式的其他纤 维种类和基体材料的 FRP 筋中.

$$\tau = \begin{cases} \tau_{\max,t} (1 - e^{-\frac{s}{s_{t,t}}})^{\beta}, & s \leq s_{1,t}; \\ \tau_{\max,t} \Big[ 1 - p_{1,t} \Big( \frac{s}{s_{1,t}} - 1 \Big) \Big] & s_{1,t} \leq s \leq s_{2,t}; \\ \tau_{2,t} \Big[ 1 - p_{2,t} \Big( \frac{s}{s_{2,t}} - 1 \Big) \Big], & s_{2,t} \leq s \leq s_{3,t} \\ \tau_{u,t}, & s_{3,t} \leq s. \end{cases}$$

$$(8)$$

$$\tau_{\max,t} = 0.9 \times e^{-(\frac{t-t_0}{T_g})^4} + 0.1 \times e^{-(\frac{t-t_0}{T_d})^4}, \quad (9)$$

$$s_{1,t} = 0.6 \times e^{-(\frac{t-t_0}{T_g})^4} + 0.1 \times e^{-(\frac{t-t_0}{T_d})^4}, \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{1}{s_{r,t}} = 0.0012 \times (t - t_0)^2 + 4, \quad (11)$$

$$\beta = 0.4, \qquad (12)$$

$$\tau_{2,t} = \tau_{\max,t} \times \begin{cases} 0.8, & t_0 \leq t \leq T_g; \\ 0.8 - \frac{t - T_g}{T_d}, & T_g \leq t \leq T_d. \end{cases}$$

$$p_{1,t} = 0.14,$$
 (14)

$$p_{2,t} = \begin{cases} 0.14 - 0.001 \ 9 \times (t - 20), \ t_0 \leq t \leq T_g; \\ 0.01, & T_g \leq t \leq T_d. \end{cases}$$

$$\tau_{u,t} = \min(0.3\tau_{\max}, \tau_{2,t}).$$
(16)



## 5 结 论

1)进行了 20~350 ℃ 温度范围内共 49 根 FRP 筋与混凝土的拉拔试验,结果表明,粘结强度 随温度升高显著下降,粘结力的衰减集中出现在 60~120℃环氧树脂的玻璃化温度区间,200℃时 的粘结力仅为常温下的15%.

2) 高温下 FRP 筋与混凝土的粘结破坏模式 为 FRP 主筋与表面喷砂层间的界面剥离破坏,该 种破坏形式决定了其粘结性能与 FRP 筋基体的 热学性能直接相关,而受纤维种类、筋直径、保护 层厚度的影响较小.

• 15 •

3)结合材料热分析试验结果,提出了 FRP 筋 与混凝土粘结强度随温度的衰减模型,该模型以 树脂玻璃化温度 T<sub>g</sub>和热分解温度 T<sub>d</sub>为控制参数, 具有较强的通用性并可应用于其他树脂材料和纤 维类型的 FRP 筋中,经验证与国内外高温拉拔试 验结果有较好的吻合性.

4)由不同温度下粘结滑移曲线的变化规律 可知,随着温度升高,粘结强度不断减小,峰值滑 移量也不断减小.高温下的滑移曲线在峰值时不 再出现平滑段,FRP 筋在达到峰值粘结力后发生 了剥离破坏而导致粘结力突降,降低幅度可达 20%.

5)根据 FRP 筋与混凝土粘结破坏的特点,提 出了常温三阶段和高温四阶段的粘结滑移本构模 型,该模型以 CMR、mBEP 模型为基础,通过试验 回归得到模型中的各项参数,经验证该模型与试 验结果具有较好的吻合性,且可推广应用于相同 破坏模式下的不同树脂材料和纤维类型的 FRP 筋中.

# 参考文献

- [1] CHOWDHURY E U, GREEN M F, BISBY L A, et al. Thermal and mechanical characterization of fibre reinforced polymers, concrete, steel, and insulation materials for use in numerical fire endurance modeling
  [J]. National Research Council-Canada Institute for Research in Construction [NRC-CIRC] (NRCC-49684), Ottawa, Canada, 2007:1-10.
- [2] KATZ A, BERMAN N. Modeling the effect of high temperature on the bond of FRP reinforcing bars to concrete[J]. Cement & Concrete Composites, 2000, 22 (6):433-443.
- [3] ABBASI A, HOGG P J. Temperature and environmental effects on glass fibre rebar: modulus, strength and interfacial bond strength with concrete [J]. Composites Part B-Engineering, 2005, 36(5):394-404.
- GALATI N, NANNI A, DHARANI L R, et al. Thermal effects on bond between FRP rebars and concrete [J]. Composites Part A-Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(8):1223 - 1230.

- [5] 吕西林,周长东,金叶.火灾高温下 GFRP 筋和混凝
   土粘结性能试验研究 [J].建筑结构学报,2007,28
   (5):32-39.
- [6] WANG Y C, WONG P, KODUR V. An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures[J]. Composite Structures, 2007, 80(1): 131 - 140.
- [7] 袁广林,郭操,吕志涛. 高温下钢筋混凝土粘结性能的试验与分析 [J]. 工业建筑, 2006, 36(2):57-60.
- [8] 郭恒宁,张继文. FRP 筋混凝土粘结滑移模型的研究 和试验分析 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2007(2):21 -24.
- [9] 薛伟辰,刘华杰,王小辉. 新型 FRP 筋粘结性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2004(2):104-109.
- [10]张海霞,朱浮声,孙丽,等. FRP 筋与混凝土粘结滑 移试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2008,24(6):989-992.
- [11] KATZ A, BERMAN N, Bank L C. Effect of high temperature on bond strength[J]. Journal of Composites for Construction, 1999, 3(2):73-81.
- [12] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R.
   Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete
   [J]. Journal of Composites for Construction, 1997, 1
   (2):40-51.
- [13] ELIGEHAUSEN R, POPOV E P, BERTERO V V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations: experimental results and analytical model [R]. US: Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1983.
- [14] CEB-FIP Model code 1990 [S]. London: Comite Euro-International Du Beton, 1991.
- [15] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R. Bond characteristics and anchorage length of FRP rebars
   [C]//Proceedings of 2nd International Conference on Advanced Composite Material in Bridge Structure.
   Montreal, Quebec, Canada: The Canadian Society of Civil Engineering, 1996: 909 – 916.

(编辑 赵丽莹)