

不同温度下钢筋与钢纤维混凝土的黏结-滑移本构研究

陈艳军¹, 孙海军², 李晓东^{1,*}, 崔祎菲¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 山东招金产业发展有限公司, 烟台 265400)

摘要:主要研究了钢筋与钢纤维混凝土(SFRC)在不同温度下(20、200、400、600、800 °C)的黏结-滑移本构关系。对 14 个钢纤维体积掺量为 1.5% 的 SFRC 试件进行中心拉拔试验,分析钢筋与 SFRC 在不同温度下的黏结性能,得到不同温度下的黏结-滑移关系曲线。试验结果表明:钢筋与 SFRC 的极限黏结强度随着温度的升高而减小,400~800 °C 较 20~200 °C 降幅明显;峰值滑移量随温度的升高而增大。基于损伤力学理论建立界面黏结损伤模型,分析不同温度下钢筋与 SFRC 的黏结损伤规律,并对界面黏结损伤变量和相对滑移值进行回归分析,得到不同温度下钢筋与 SFRC 黏结-滑移本构方程。将不同温度下的黏结-滑移拟合曲线与试验曲线进行对比分析,结果表明,该本构方程能够较为准确地模拟钢筋与 SFRC 的黏结性能。

关键词:钢纤维混凝土;黏结-滑移本构方程;界面黏结损伤模型;温度

中图分类号:TU375

文献标志码:A

文章编号:1673-4602(2025)01-0034-09

Study on the bond-slip constitutive of steel bar and steel fiber reinforced concrete at different temperatures

CHEN Yanjun¹, SUN Haijun², LI Xiaodong^{1,*}, CUI Yifei¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Shandong Zhaojin Industrial Development Co., Ltd., Yantai 265400, China)

Abstract: The bond-slip constitutive relationship between steel bar and steel fiber reinforced concrete (SFRC) at different temperatures (20, 200, 400, 600 and 800 °C) was investigated in this study. The central pull-out tests of 14 SFRC specimens with the steel fiber of volume 1.5% were conducted. The bond-slip relationship curves at different temperatures were developed by analyzing the bond characteristics of the steel bar and SFRC at different temperatures. The test results indicated that the ultimate bond strength between the steel bar and SFRC decreased with the increase of temperature. The decreasing range between 400 °C and 800 °C was more obvious than that between 20 °C and 200 °C. The peak slip increased with the increase of temperature. Based on the damage mechanics theory, the interface bond damage model was established to analyze the bond damage law of steel bar and SFRC at different temperatures. Regression analysis was performed on the interface bond damage variables and relative slip values to obtain the bond-slip constitutive equations of steel bar and SFRC at dif-

收稿日期:2023-04-18

基金项目:国家自然科学基金(52108223)

作者简介:陈艳军(1997—),男,山东齐河人。硕士,研究方向为建筑结构火灾行为及灾后处理。E-mail:961128798@qq.com。

* 通信作者:李晓东(1976—),男,河北唐山人。博士,副教授,主要从事建筑结构火灾行为及灾后处理方面的研究。

E-mail:Xiaodongli1976@163.com。

ferent temperatures. The bond-slip fitting curves at different temperatures were compared with the experimental curves. The results indicated that the constitutive equation can accurately simulate the bond performance of steel bar and SFRC.

Key words: steel fiber reinforced concrete(SFRC); bond-slip constitutive equation; interface bond damage model; temperature

钢纤维具有良好的受拉性能,将其均匀掺和在混凝土中,可对混凝土起到限裂和阻裂、增加强度、提高韧性和耐久性的作用^[1-2],并且对钢筋和钢纤维混凝土(SFRC)之间的黏结性能也起到很大的改善效果^[3]。CHU 等^[4]研究了不同的钢纤维掺量和钢纤维尺寸对 SFRC 的黏结性能的影响。ZHANG 等^[5]分析了 SFRC 内部的钢纤维和骨料随机分布情况对 SFRC 黏结性能的影响。还有学者考虑钢筋锈蚀^[6]和盐冻循环^[7]对钢筋与 SFRC 黏结性能的影响开展中心拉拔试验,并得到了相应的黏结性能变化规律。火灾是造成结构安全性丧失的重大威胁之一,结构受火时,火灾产生的高温会引起钢筋与混凝土黏结性能的损伤^[8-9],从而导致结构整体承载能力下降。因此,对高温下钢筋与 SFRC 之间的黏结性能研究显得尤为重要。

黏结-滑移本构反映钢筋与混凝土之间的协同性能,为此国内外许多学者通过大量试验研究和理论分析取得了不少研究成果。LI 等^[10]进行了高温后钢筋与 SFRC 的黏结性能试验,通过对试验结果进行拟合,建立了考虑钢纤维掺量和温度的黏结-滑移本构方程。徐有邻等^[11]给出了五段式钢筋混凝土黏结-滑移本构模型,定义了 4 个黏结锚固特征强度。WU 等^[12]在前人试验的基础上,考虑混凝土损伤、钢筋应力及横向约束作用的影响,建立了新的黏结-滑移本构方程。金星^[13]进行了钢筋与 SFRC 局部黏结试验,通过分析破坏现象和损伤规律,得到了黏结-滑移本构方程。

鉴于高温下钢筋与 SFRC 的黏结劣化较为复杂,并且高温下的黏结性能损伤规律还不够完善,本文通过不同温度下钢纤维体积掺量为 1.5% 的 SFRC 试件中心拉拔试验,建立界面损伤模型,并对界面黏结损伤变量和相对滑移值进行拟合分析,建立了不同温度下钢筋与 SFRC 黏结-滑移本构方程,为火灾下钢筋与 SFRC 结构的损伤评估和高温环境下的锚固设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料及配合比

试验水泥选用普通硅酸盐水泥;钢纤维采用端钩状钢纤维;细骨料采用粒径小于 5 mm 的河砂;粗骨料采用粒径为 5~20 mm 的花岗岩;试验用水为普通自来水;减水剂为聚羧酸类高性能减水剂。钢纤维混凝土的立方体抗压强度为 67 MPa,劈裂抗拉强度为 6.7 MPa。钢筋采用直径为 14 mm 的 HRB500 级螺纹钢,屈服强度为 581 MPa,极限强度为 755 MPa,弹性模量为 2.041×10^5 MPa。具体配合比见表 1。

表 1 钢纤维混凝土配合比

钢纤维体积掺量/%	水灰比	石子/(kg·m ⁻³)	河砂/(kg·m ⁻³)	水泥/(kg·m ⁻³)	水/(kg·m ⁻³)	减水剂/(kg·m ⁻³)
1.5	0.38	1280	632	433.7	164.8	67.0

1.2 试件设计

制作 14 个钢纤维体积掺量为 1.5% 的 SFRC 中心拉拔试件^[14],试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm。试件中心处钢筋的埋置长度为 5d(d 为钢筋直径),即 70 mm,两端用 PVC 管对钢筋和 SFRC 进行阻隔,如图 1 所示。其中,4 个试件的黏结中心位置预埋热电偶,用于观测试件在高温环境(200、400、600、800 °C)下的升温情况;10 个试件不埋设热电偶,用于测试不同温度(20、200、400、600、800 °C)下的黏结性能。

1.3 试验装置

升温装置为 GWX-1100 型电加热高温环境试验箱,炉膛尺寸为 220 mm×350 mm×300 mm,最高工作温度为 1100 °C;采用 GWX-1100 型电控系统对整个升温过程进行控制,试验升温速率设置为

8 °C/min^[15];将 K 型热电偶连接 Agilent 34980A 对拉拔试件黏结区部位的温度进行实时采集;加载装置采用 MTS E45.305 型拉拔试验机,加载速率范围为 0.001~250 mm/min,利用移动支架将高温环境试验箱移至加载装置中心位置,夹具夹紧钢筋,通过位移控制进行高温下中心拉拔试验,整个过程由 MTS TestSuite 软件采集横梁位移与荷载数据;钢筋自由端(即钢筋与混凝土黏结区低端无外荷载处)的位移值通过拉线式位移计连接到 DH3816N 静态采集仪上,实时观测并记录^[11]。试验装置如图 2 所示。

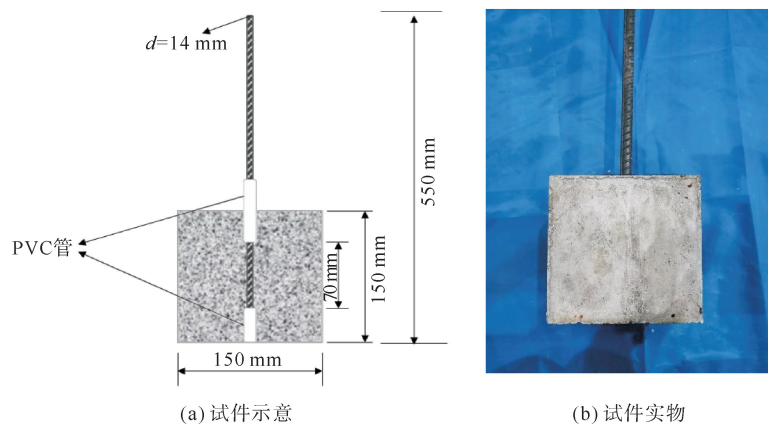


图 1 中心拉拔试件

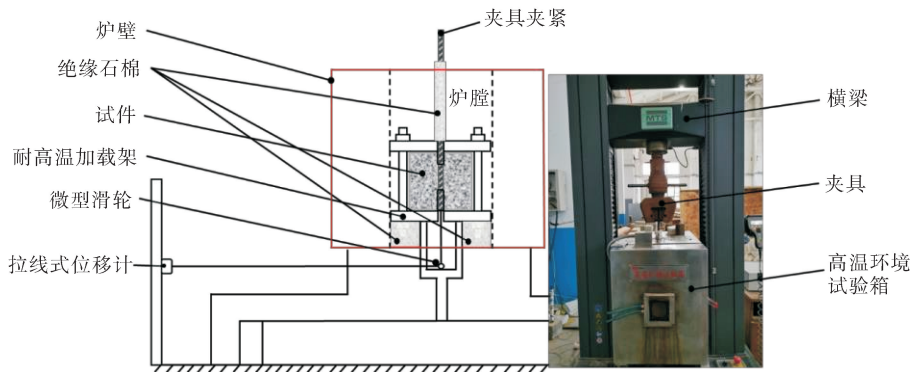


图 2 拉拔试验装置

2 试验结果及分析

2.1 升温曲线

炉膛温度随时间变化曲线如图 3 所示。在炉膛温度达到试验预设温度后保持恒温 6 h,此时钢筋与 SFRC 的黏结区温度基本保持恒定,且各试件均未发生爆裂现象。试件黏结区升温曲线如图 4 所示。

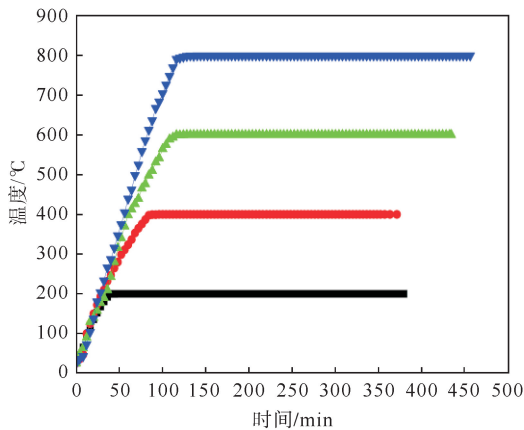


图 3 炉膛升温曲线

—■— 200 °C; —●— 400 °C; —▲— 600 °C; —▼— 800 °C

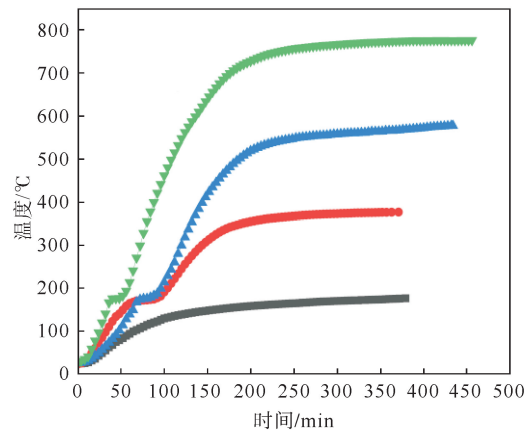


图 4 试件黏结区升温曲线

—■— 200 °C; —●— 400 °C; —▲— 600 °C; —▼— 800 °C

2.2 高温下平均极限黏结强度及平均峰值滑移量

黏结强度(τ)采用公式(1)进行计算,试件在不同温度下的峰值统计见表 2。

$$\tau = \frac{F}{\pi d l_a} \quad (1)$$

式中: τ 为黏结强度; F 为拉应力; d 为钢筋直径; l_a 为钢筋的黏结锚固长度。

表 2 试件在不同温度下的峰值统计

试件编号	极限拉应力/kN	极限黏结强度/MPa	平均极限黏结强度/MPa	峰值滑移量/mm	平均峰值滑移量/mm
SFRC-20-1	96.74	31.42	31.93	1.01	1.02
SFRC-20-2	99.86	32.43		1.03	
SFRC-200-1	89.57	29.09	29.77	1.04	1.11
SFRC-200-2	93.77	30.45		1.16	
SFRC-400-1	78.61	25.53	26.08	1.42	1.49
SFRC-400-2	82.01	26.63		1.56	
SFRC-600-1	53.27	17.3	17.79	1.78	1.84
SFRC-600-2	56.27	18.27		1.90	
SFRC-800-1	26.29	8.53	8.99	2.10	2.16
SFRC-800-2	29.08	9.44		2.22	

注:试件编号中 SFRC 代表钢筋与钢纤维混凝土拉拔试件,20 表示常温下,200 代表试验条件为 200 °C 高温下,以此类推。

不同温度下钢筋与 SFRC 的平均极限黏结强度与温度的关系如图 5 所示。由图 5 可知,平均极限黏结强度随着温度的升高而降低,400~800 °C 较 20~200 °C 降幅明显。原因是,黏结强度主要与化学胶着力、摩擦力和机械咬合力有关,温度的升高降低了钢筋与 SFRC 之间的化学胶着力,但 200 °C 以下钢筋与 SFRC 之间的摩擦力和机械咬合力受影响较小,因此极限黏结强度下降幅度较小;400 °C 以上钢筋与 SFRC 内部压力变小,两者之间的摩擦力和机械咬合力减小,从而导致极限黏结强度降幅变大^[16]。

不同温度下钢筋与 SFRC 平均峰值滑移量与温度的关系如图 6 所示。由图 6 可知,平均峰值滑移量随温度的升高而增大。原因是,随着温度的不断升高,黏结应力下降,钢筋与 SFRC 之间的延性变大,从而导致滑移量增大。

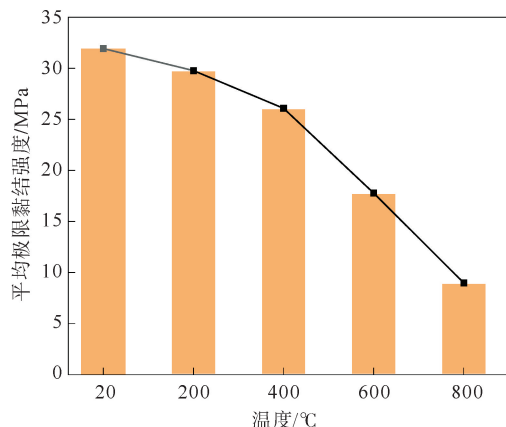


图 5 平均极限黏结强度与温度的关系

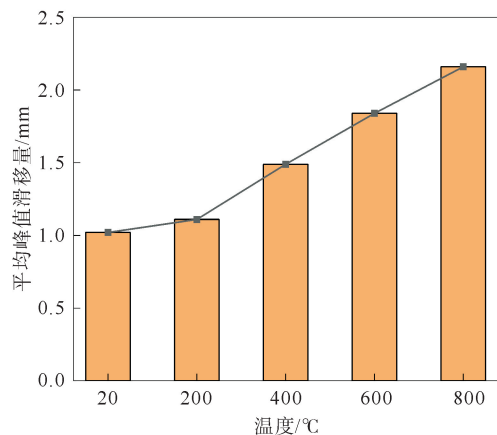


图 6 平均峰值滑移量与温度的关系

2.3 黏结-滑移曲线

黏结应力(τ)与滑移量(s)之间的关系如图7所示,根据试验曲线得到黏结滑移典型曲线,如图8所示。

将不同温度下钢筋与 SFRC 黏结-滑移曲线划分为 5 个阶段(图 8):初始微滑移阶段(I)、滑移阶段(II)、拔出破坏阶段(III)、应力下降阶段(IV)、应力残余阶段(V)。初始微滑移阶段(I):此时的拉应力较小,钢筋与 SFRC 之间的滑移量极小,曲线呈直线变化,试件处于弹性工作阶段。滑移阶段(II):随着拉应力的增大,滑移量也随之变大,曲线逐渐呈非线性关系增长,试件处于弹塑性阶段。拔出破坏阶段(III):随着拉应力的持续增大,钢筋与 SFRC 之间的相互作用力也随之变大,当钢筋肋与 SFRC 之间的挤压力达到 SFRC 的极限环向拉应力时,试件发生破坏,但钢纤维的阻裂效应抑制了 SFRC 基体的劈裂,从而发生拔出破坏,此时 τ - s 曲线达到峰值。应力下降阶段(IV):曲线达到峰值点后,此时的极限黏结应力仍然存在,随着滑移量的增大,黏结应力逐渐减小,进入下降阶段,此阶段的特点是黏结应力下降速度变快,滑移量快速增加。应力残余阶段(V):随着黏结应力下降速度变缓,曲线进入残余应力阶段,此阶段黏结应力与滑移量逐渐减小,曲线趋于平直。

3 黏结-滑移本构方程

3.1 黏结损伤变量定义

根据损伤力学的研究方法,把钢筋与混凝土的黏结面视为连续均匀材料,通过假定黏结性能参数来定义黏结面的材料损伤变量^[17]。设材料未损伤时的黏结性能参数为 B ,材料损伤过程中的黏结性能参数为 B_1 ,则黏结损伤变量 D 的表达式为

$$D = \frac{B - B_1}{B} \quad (2)$$

式中: D 为黏结损伤变量,取值区间为 $[0, 1]$ 。

当黏结面无损伤时, $B_1 = B$,则 $D = 0$;当黏结面处于损伤过程中时, $0 < B_1 < B$,则 $0 < D < 1$;当黏结面完全损坏时, $B_1 = 0$,则 $D = 1$ 。

3.2 钢筋与钢纤维混凝土界面损伤模型

根据图9所示,黏结-滑移曲线的割线斜率呈逐渐减小趋势,这种趋势可以反映钢筋与 SFRC 界面黏结性能的劣化,物理意义表述为:阻止产生单位相对滑移量所需的黏结应力,用 B' 表示。则:

$$\tau = B' \times s \quad (3)$$

初始加载阶段,在区间 $(0, s_0)$ 内界面黏结性能处于弹性阶段,对钢筋与 SFRC 的黏结面几乎无损伤,此时的黏结性能参数 B 是一个定值,可由曲线斜率(τ/s)确定。随着拉应力的增大, B 逐渐变小,黏结面开始断裂,黏结-滑移曲线随着拉力的增大发生非弹性变化,黏结性能开始减弱。

根据式(3)和应变等效理论,应力作用在损伤材料上引起的应变等于有效应力作用在未损伤材料上引

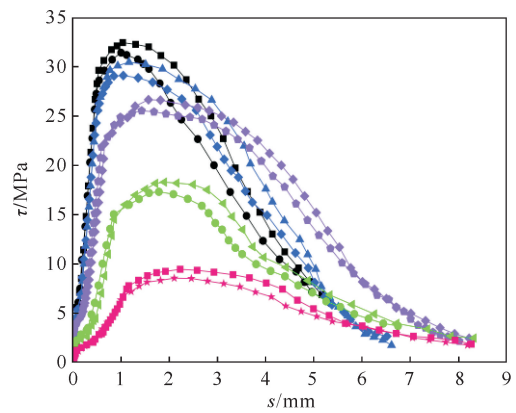


图7 不同温度下的黏结-滑移曲线

● SFRC-20-1; ■ SFRC-20-2;
 ◆ SFRC-200-1; ▲ SFRC-200-2;
 ◆ SFRC-400-1; ◆ SFRC-400-2;
 ◆ SFRC-600-1; ◆ SFRC-600-2;
 ◆ SFRC-800-1; ◆ SFRC-800-2

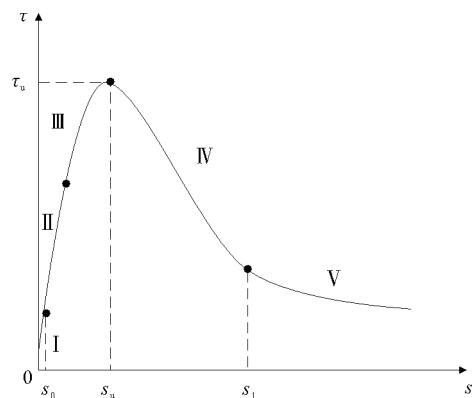


图8 黏结-滑移典型曲线

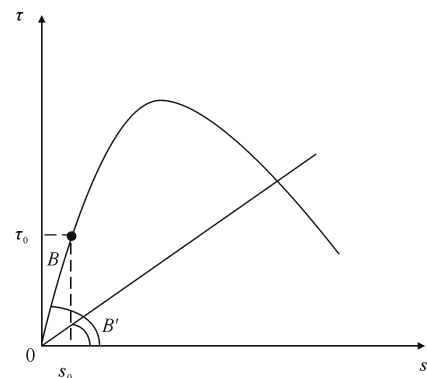


图9 黏结应力与滑移关系示意

起的应变。将此理论运用到本试验,可以解释为:黏结破坏界面上由拉应力引起的相对滑移量相当于整个黏结面上有效黏结应力在未损伤黏结面上对应的相对滑移量,即式(4):

$$s = \frac{\Delta\tau}{B} = \frac{\tau}{B_1} \tag{4}$$

将式(2)代入式(4),可得

$$\tau = B_1 \times s = s \times (1 - D)B \tag{5}$$

由此得到黏结-滑移本构方程,包含两部分:黏结面未损伤部分和黏结面损伤部分:

$$\tau = \begin{cases} B \times s & (0 < s < s_0) \\ B_1 \times s = s \times (1 - D)B & (s \geq s_0) \end{cases} \tag{6}$$

黏结界面损伤方程可由式(6)导出:

$$D = \begin{cases} 0 & (0 < s < s_0) \\ 1 - \frac{\tau}{B \times s} & (s \geq s_0) \end{cases} \tag{7}$$

式中: s_0 为微滑移阶段和滑移阶段之间的临界相对滑移点,取值很小。

3.3 不同温度下损伤-滑移(D-s)曲线

根据试验曲线各阶段的特点及具体试验数据对钢筋与 SFRC 的黏结-滑移关系进行拟合,见式(8)。

$$\tau = \begin{cases} B \times s & (0 < s \leq s_0) \\ a_m + b_m \times s + c_m \times s^2 & (s_0 < s \leq s_1) \\ \frac{1}{p + q \times s} & (s > s_1) \end{cases} \tag{8}$$

式中: a_m 、 b_m 、 c_m 、 p 、 q 为可以通过拟合确定的参数; m 为曲线非线性变化的 3 个阶段(滑移阶段、拔出破坏阶段、应力下降阶段), $m=1,2,3$; s_1 为应力下降阶段和应力残余阶段之间的滑移量; B 为黏结面黏结性能参数, $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时 $B=68.02\text{ N/mm}^3$, $200\text{ }^\circ\text{C}$ 时 $B=50.45\text{ N/mm}^3$, $400\text{ }^\circ\text{C}$ 时 $B=35.07\text{ N/mm}^3$, $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时 $B=17.13\text{ N/mm}^3$, $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时 $B=6.55\text{ N/mm}^3$ 。

根据以上黏结性能参数,结合式(7),换算绘制出试件在不同温度下的损伤-滑移(D-s)曲线,如图 10 所示。由图 10 可知,在不同温度下黏结面损伤变量随钢筋与 SFRC 之间相对滑移量的增大而增大。对于同一损伤情况,相对滑移量随温度升高而增大,原因是,随温度的升高黏结强度逐渐下降,黏结面的延性变大,从而导致滑移量增大;在相同滑移量下,黏结损伤变量随温度的升高而减小,原因是,界面损伤变量与钢筋和 SFRC 之间的黏结损伤性能呈反比,温度越高钢筋与 SFRC 之间的黏结损伤越大,从而导致界面损伤变量减小。

钢筋与 SFRC 界面黏结性能参数在不同温度下的变化趋势如图 11 所示。由图 11 可知,在不同温度下黏结性能参数明显随着温度的升高而降低,且相邻温度之间的差值相似,整体呈线性关系。采用式(9)

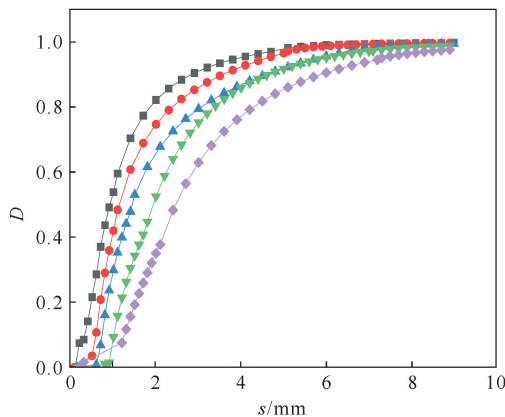


图 10 不同温度下的 D-s 曲线

■—20 °C; ●—200 °C; ▲—400 °C; ▼—600 °C; ◆—800 °C

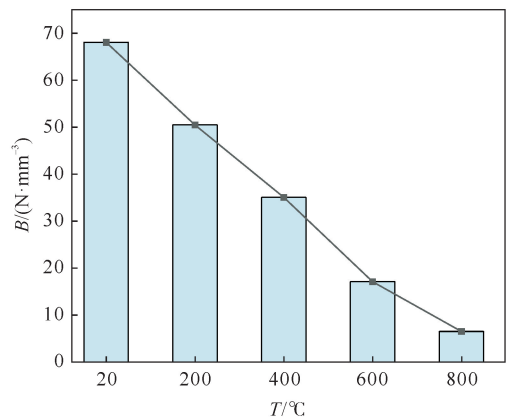


图 11 黏结性能参数与温度的关系

来描述在不同温度下黏结性能参数的变化趋势,其中 $R^2=0.9938$ 。

$$B = -0.0796 \times T + 69.675 \quad (20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 800\text{ }^\circ\text{C}) \quad (9)$$

3.4 损伤演变方程

根据张凤维^[18]对损伤-滑移曲线的分析,结合上述 $D-s$ 曲线的变化规律,分3段进行回归分析并拟合出损伤演变方程(式(10)),分别取曲线曲率的初始上升点和曲线趋于平缓的拐点作为三段式的2个分界点。不同温度下 $D-s$ 曲线拟合特征值如表3所示。

$$D = \begin{cases} B \times s & (0 < s \leq s_s) \\ a + \frac{b}{s+c} & (s_s < s \leq s_p) \\ m + n \times e^p & (s > s_p) \end{cases} \quad (10)$$

式中: a 、 b 、 c 、 m 、 n 、 p 为可以通过 $D-s$ 曲线确定的拟合参数,数值见表3; s_s 为曲线初始上升点; s_p 为曲线趋于平缓的拐点。

表3 不同温度下损伤-滑移曲线拟合特征值

温度/ °C	$B/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-3})$	s/mm ($0 < s \leq s_s$)	第二阶段拟合				s/mm ($s_s < s \leq s_p$)	第三阶段拟合				s/mm ($s > s_p$)
			a	b	c	R^2		m	n	p	R^2	
20	68.02	(0, 0.22]	1.168	-0.960	0.544	0.993	(0.22, 4.7]	158.187	-157.199	-5.607	0.997	(4.7, +∞)
200	50.45	(0, 0.20]	1.154	-0.992	0.363	0.994	(0.20, 5.0]	158.187	-157.191	-5.607	0.998	(5.0, +∞)
400	35.07	(0, 0.16]	1.148	-1.232	0.459	0.996	(0.16, 5.5]	30.073	-29.065	-3.559	0.997	(5.5, +∞)
600	17.13	(0, 0.20]	1.304	-2.199	0.745	0.997	(0.20, 6.0]	3.854	-2.844	-2.082	0.999	(6.0, +∞)
800	6.55	(0, 0.38]	1.242	-2.271	0.545	0.997	(0.38, 6.5]	11.917	-10.897	-2.539	0.995	(6.5, +∞)

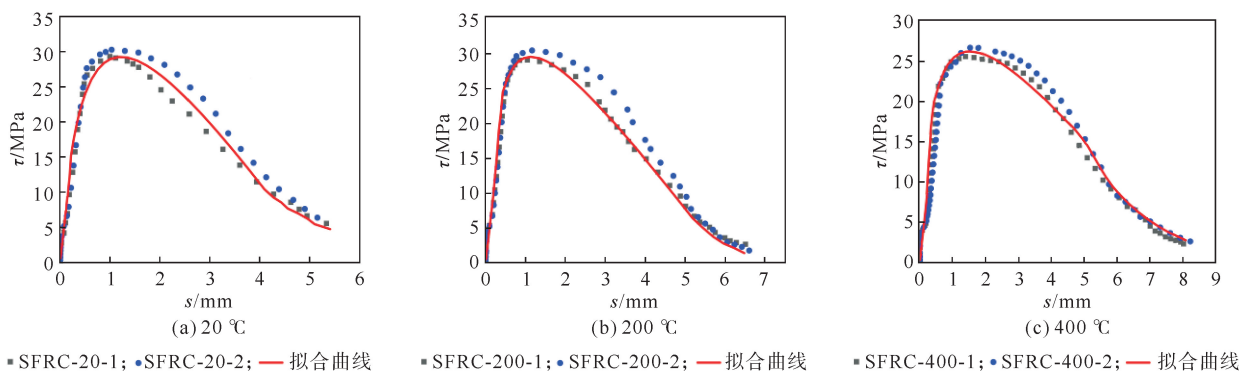
3.5 黏结-滑移本构方程

$$\tau = \begin{cases} (-0.0796 \times T + 69.675) \times s & (0 < s \leq s_s) \\ (-0.0796 \times T + 69.675) \times s \times \left[1 - \left(a + \frac{b}{s+c} \right) \right] & (s_s < s \leq s_p) \\ (-0.0796 \times T + 69.675) \times s \times [1 - (m + n \times e^p)] & (s > s_p) \end{cases} \quad (11)$$

式中: T 为试验温度, $20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 800\text{ }^\circ\text{C}$ 。

将实测黏结-滑移曲线与拟合曲线进行对比,如图12所示。从图12中可以看出,计算结果和试验测试结果整体吻合程度良好。

将实测峰值滑移量带入拟合方程得到极限黏结强度计算值 τ_c ,通过与平均极限黏结强度试验值 $\bar{\tau}_u$ 进行比较,核算拟合公式的准确性,并进行误差分析。表4为试验值与计算值核算分析。经分析比较,计算误差均在 $\pm 5\%$ 以内,计算结果与试验结果吻合良好。



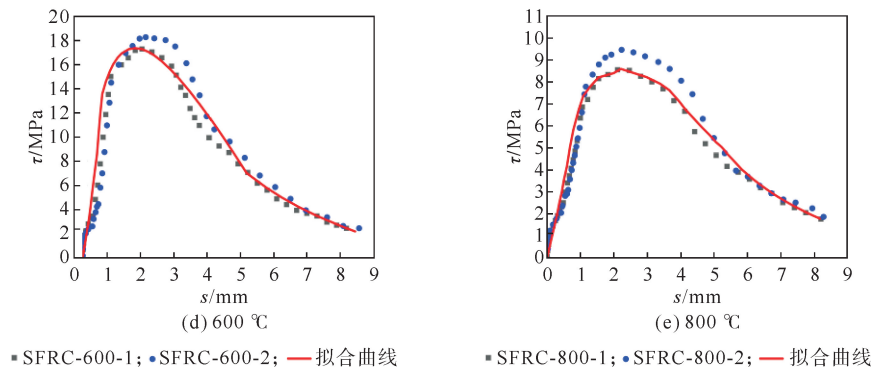


图 12 不同温度下的试验曲线与拟合曲线对比

将本文、文献[19]、文献[20]关于峰值滑移量和试验温度的相关数据带入式(11),得到相应的计算极限黏结强度,对相对极限黏结强度试验值($\tau_u^T/\tau_u^{20^\circ\text{C}}$)和相对极限黏结强度计算值($\tau_c^T/\tau_c^{20^\circ\text{C}}$)的误差进行比较,误差分析如图 13 所示,其中, τ_u^T 、 τ_c^T 分别为试件在温度为 T 时极限黏结强度试验值和计算值; $\tau_u^{20^\circ\text{C}}$ 、 $\tau_c^{20^\circ\text{C}}$ 分别为试件在常温下的极限黏结强度试验值与计算值。

表 4 试验值与计算值核算分析

试件编号	$\bar{\tau}_u/\text{MPa}$	τ_c/MPa	$\tau_c/\bar{\tau}_u$	误差/%
SFRC-20	31.92	31.34	0.982	-1.85
SFRC-200	29.77	29.54	0.992	-0.78
SFRC-400	26.08	26.63	1.020	2.07
SFRC-600	17.78	17.37	0.977	-2.36
SFRC-800	8.985	8.58	0.955	-4.72

由图 13 可知,计算值绝大部分在±20%误差线以内,变异系数为 8.3%,误差在可控范围内,表明该模型可较准确地计算不同温度下钢筋与钢纤维混凝土的极限黏结强度。

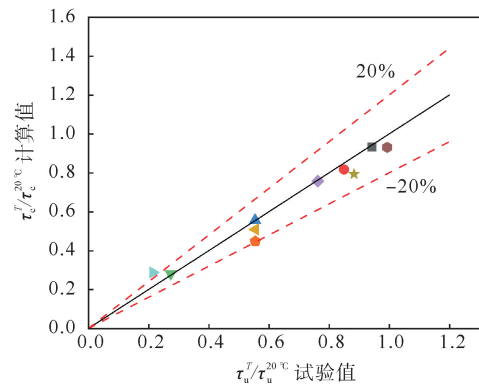


图 13 计算值与试验值误差比较
 本文: ■ 200 °C; ● 400 °C; ▲ 600 °C; ▼ 800 °C
 文献[19]: ◆ 450 °C; ◆ 650 °C; ◆ 800 °C
 文献[20]: ● 200 °C; ★ 400 °C; ★ 600 °C

4 结论

- 1) 不同温度下钢筋与 SFRC 黏结-滑移曲线划分为 5 个阶段:初始微滑移阶段、滑移阶段、拔出破坏阶段、应力下降阶段、应力残余阶段。
- 2) 高温对试件的极限黏结强度与峰值滑移量均有不同程度的影响。黏结强度随着温度的升高而降低,400~800 °C 较 20~200 °C 降幅明显;峰值滑移量随温度的升高而增大。
- 3) 通过对损伤-滑移曲线的分析,发现黏结面损伤变量随着钢筋与 SFRC 相对滑移量的增大而增大;对于同一损伤情况,相对滑移随温度升高而增大;在相同滑移量下,黏结损伤变量随温度的升高而减小。
- 4) 提出了基于损伤力学理论的黏结-滑移本构关系,通过对拟合曲线和试验曲线的对比以及对计算极限黏结强度与实测极限黏结强度均值的比值进行分析,结果与试验数据吻合良好。

参考文献 (References):

[1] DA Xiang, LIU Shiqi, LI Yongjun, et al. Improvement of flexural and cyclic performance of bridge deck slabs by utilizing steel fiber reinforced concrete (SFRC)[J]. Construction and Building Materials, 2022, 329: 127184.
 [2] 刘鑫,侯新宇,林军,等. 实时高温下钢纤维混凝土的力学特性及其声发射响应[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(2): 447-454.
 LIU Xin, HOU Xinyu, LIN Jun, et al. Mechanical properties and acoustic emission response of steel fiber reinforced concrete under real

- time high temperature[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(2): 447-454.
- [3] HE Zhenjun, CHEN Ying, MA Yanni, et al. The study on bond-slip constitutive model of steel-fiber high-strength recycled concrete[J]. *Structures*, 2021, 34: 2134-2150.
- [4] CHU S H, KWAN A K H. A new bond model for reinforcing bars in steel fibre reinforced concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 104: 103405.
- [5] ZHANG W, LEE D, LEE C J, et al. Bond performance of SFRC considering random distributions of aggregates and steel fibers[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 291: 123304.
- [6] 张弘港, 赵建锋, 彭昊. 锈蚀钢筋-混凝土黏结性能退化试验研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2023, 44(5): 1-10.
ZHANG Honggang, ZHAO Jianfeng, PENG Hao. Experimental study on degradation of bond performance between corroded reinforcement and concrete[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2023, 44(5): 1-10.
- [7] 李新明, 商怀帅. 盐冻循环对变形钢筋与再生混凝土黏结性能的影响[J]. *青岛理工大学学报*, 2015, 36(4): 23-29.
LI Xinming, SHANG Huaishuai. Influence of deicer-frosting cycles on bond property of deformed bar and recycled concrete[J]. *Journal of Qingdao Technological University*, 2015, 36(4): 23-29.
- [8] 张彦春, 胡晓波, 白成彬. 钢纤维混凝土高温后力学强度研究[J]. *混凝土*, 2001(9): 50-53.
ZHANG Yanchun, HU Xiaobo, BAI Chengbin. Research on mechanical strength of steel fiber reinforced concrete after exposure to high temperature[J]. *Concrete*, 2001(9): 50-53.
- [9] 谢开仲, 朱茂金, 刘振威, 等. 高温后钢纤维机制砂混凝土力学强度试验研究[J]. *混凝土*, 2022(5): 1-5.
XIE Kaizhong, ZHU Maojin, LIU Zhenwei, et al. Experimental study on mechanical strength of steel fiber reinforced sand concrete after high temperature[J]. *Concrete*, 2022(5): 1-5.
- [10] LI Xiaodong, LU Chengdong, CUI Yifei, et al. Study on the bond properties between steel bar and fiber reinforced concrete after high temperatures[J]. *Structures*, 2023, 49: 889-902.
- [11] 徐有邻, 沈文都, 汪洪. 钢筋砼粘结锚固性能的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 1994(3): 26-37.
XU Youlin, SHEN Wendu, WANG Hong. An experimental study of bond-anchorage properties of bars in concrete[J]. *Journal of Building Structure*, 1994(3): 26-37.
- [12] WU H Q, GILBERT R I. Modeling short-term tension stiffening in reinforced concrete prisms using a continuum-based finite element model[J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(10): 2380-2391.
- [13] 金星. HRB600 钢筋与钢纤维高强混凝土粘结性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
JIN Xing. Bond properties between HRB600 steel bar and steel fiber reinforced high-strength concrete[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [14] GB/T 50152—2012, 混凝土结构试验方法标准[S].
GB/T 50152—2012, Standard for test method of concrete structures[S].
- [15] 周子健, 霍静思, 李智. 高温下钢筋与混凝土粘结性能试验与分析[J]. *建筑结构*, 2019, 49(10): 76-80.
ZHOU Zijian, HUO Jingsi, LI Zhi. Experimental study and analysis on bond behaviour between steel bar and concrete[J]. *Building Structure*, 2019, 49(10): 76-80.
- [16] 陈俊睿. 高温后钢与再生混凝土界面黏结滑移性能试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
CHEN Junrui. Study on bond slip behavior of interface between steel and recycled concrete after high temperature[D]. Nanning: Guangxi University, 2016.
- [17] 黄闽莉. 钢筋混凝土界面损伤研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
HUANG Minli. Study on interface damage of reinforced concrete[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [18] 张凤维. 钢筋与混凝土高温粘结性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
ZHANG Fengwei. Research on bond performance between reinforcement and concrete at high temperature[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [19] VARONA F B, BAEZA F J, BRU D, et al. Evolution of the bond strength between reinforcing steel and fibre reinforced concrete after high temperature exposure[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 176: 359-370.
- [20] KEVINLY C, DU P, TAN K H. Local bond-slip behaviour of reinforcing bars in fibre reinforced lightweight aggregate concrete at ambient and elevated temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 377: 131010.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)