

UHPGC 与 HRB 600 钢筋粘结性能影响因素研究

杏 剑¹, 陈喜旺², 张 骄¹, 滕 岩¹, 孟繁春¹, 胡亚庆¹

(1. 北京建工新型建材科技股份有限公司, 102600, 北京; 2. 北京建工新型建材有限责任公司, 100015, 北京)

摘 要: 超高性能玻璃砂混凝土 (UHPGC) 是用玻璃砂替换传统超高性能混凝土 (UHPC) 中的石英砂骨料制备而成, 具有优异的工作性能和力学性能。HRB 600 钢筋是一种新型热轧带肋钢筋, 具有较高的强度和良好的延性。将两种材料组合综合发挥两者的优势, 对于提升钢筋混凝土结构、抵抗复杂荷载作用的能力意义深远。本研究分析了材料组成特征因素 (水胶比、钢纤维体积掺量和玻璃砂替换率) 对 UHPGC 和 HRB600 钢筋的粘结性能影响规律, 阐明了各因素的交互影响效应。结果显示, 水胶比和钢纤维掺量与粘结强度呈正相关, 玻璃砂替换率增大, 粘结强度呈现先增加后减小的趋势, 同时试验得到抗压强度和粘结强度呈线性关系。

关键词: UHPGC; HRB600; 粘结性能

中图分类号: TU5

文献标志码: A

文章编号: 1000-4726(2023)19-2344-05

RESEARCH ON INFLUENCING FACTORS OF BONDING PROPERTIES OF UHPGC AND HRB600 STEEL BARS

XING Jian¹, CHEN Xi-wang², ZHANG Jiao¹, TENG Yan¹, MENG Fan-chun¹, HU Ya-qing¹

(1. Beijing Construction Engineering New Building Materials Technology Co., Ltd., 102600, Beijing, China; 2. BCEG Advanced Construction Materials Co., Ltd., 100015, Beijing, China)

Abstract: Ultra-high performance glass sand concrete (UHPGC) is prepared by replacing quartz sand aggregate in conventional ultra-high-performance concrete (UHPC) with glass sand. It has excellent working and mechanical properties. HRB 600 bar is a new type of hot rolled ribbed bar with high strength and ductility. A combination of these two materials is of great significance for improving the structure and complex load resistance of reinforced concrete due to their advantages. In this study, the rules of influence of material composition characteristics (water-cement ratio, steel fiber volume content and glass sand replacement rate) on the bonding properties of UHPGC and HRB600 steel bars were analyzed, and the interaction of various factors was illustrated. Results show that the water-cement ratio and steel fiber content are positively correlated with the bonding strength. When the rate of replacement with glass sand increases, the bonding strength will increase first and then decrease. In addition, test results show a linear relationship between the compressive strength and bonding strength.

Keywords: UHPGC; HRB600; bonding performance

钢筋混凝土结构已成为应用最广泛的结构形式, 但由于普通钢筋混凝土结构具有自重大、耐久性和延性差等缺点, 不利于结构强度和安全度提升, 而且增加了后期的养护维修费用。近年来, 随着现代工程架构的高层化、大跨化、结构轻量化、环境严酷化, 对混凝土材料的力学性能及耐久性能提出了更高的要求, 研发高强度、高韧性、高耐久性的混凝土材料已成为亟须解决的问题。

近年来超高性能混凝土 (Ultra High Performance Concrete, UHPC) 展现着超高的力学性能、延性和耐久性等独特的优势, 已经成功应用于桥梁、高层建筑

筑、核电站等大型建筑。超高性能玻璃砂混凝土 (Ultra High Performance Glass Sand Concrete, UHPGC) 是以废旧玻璃研磨制得的玻璃砂替换传统 UHPC 中的石英砂骨料制备而成。传统 UHPC 骨料的常用制备方法是破碎粗砂或岩石获得具有适当级配的石英砂, 这种获取骨料的方法费时、经济性不理想, 而且破碎过程中会污染环境, 甚至会给人体带来潜在危害。在城市生活和建筑垃圾中存在大量废旧玻璃, 目前一些发达国家的废旧玻璃回收率达 70% 以上, 我国 2019 年回收率已超过 50%。通过回收废旧玻璃研磨制备而成玻璃砂, 不仅可以减少环境污染和二氧化碳排放, 而且能节约原材料。玻璃砂具有环保、易取、化学稳定性好等特点, 其吸水率比天然砂低, 因而玻璃砂混凝土具有更好的工作性能。

收稿日期: 2023-06-23

作者简介: 杏剑 (1993-), 男, 甘肃庆阳人, 硕士, e-mail: 1813649942@qq.com.

1 试验材料及方法

1.1 原材料

本研究所有混凝土混合料(UHPGC)均使用符合GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》规定的P·O 52.5水泥制备;采用的硅灰符合GB/T 27690—2011《砂浆和混凝土用硅灰》中技术指标要求。

钢筋采用HRB600带肋钢筋,性能应符合现行国家标准GB/T 1499.2—2018《钢筋混凝土用钢第2部分:热轧带肋钢筋》的规定。

在实验室首先对其基本的物理力学性能进行测试,在1000kN万能试验机上进行钢筋拉拔测试,测其屈服强度、屈服荷载、极限荷载和伸长率等物理力学性能指标,测试结果见表1。

表1 HRB600钢筋力学性能

组	最大力/kN	上屈服力/kN	下屈服力/kN	抗拉强度/MPa	上屈服强度/MPa	下屈服强度/MPa
1	327.1	263.55	258.67	860	693	681
2	313.4	246.76	246.23	824	649	648
平均值	320.25	255.15	252.45	842	671	664.5

1.2 配合比设计

研究中所采用的变量为三因素三水平组合,分别为水胶比(0.17、0.19、0.21)、钢纤维体积掺量(1%、2%、3%)和玻璃砂替换率(0%、50%、100%),采用Design-Expert 8.0设计软件进行试验方案设计、模型生成和数据分析。根据软件设计结果得到试验方案,一共为17组试验,各试验组原材料配合比见表2。

1.3 试件制备

为使混凝土结构均匀,避免颗粒团聚,所有混凝土混合料均采用搅拌机按下列程序进行搅拌。

(1)将水泥、硅灰、石英砂、玻璃砂、石英粉等干燥组分按表2所列混合料的配合比称重并倒入搅拌机内,低速搅拌3min后准备加入水和减水剂。

(2)在一半用量的水中稀释一半用量的减水剂,在2min内逐渐加入,在下一个2min的搅拌过程中逐渐加入其余的水和减水剂。

(3)最后将钢纤维缓慢加入,继续搅拌8min,直至纤维均匀分布,混凝土成型。

拌和结束时,采用坍落度试验和流动度试验测定混凝土拌合物的新拌性能,以表征其和易性。在20℃和95%RH条件下放置24h,然后在20℃和95%RH的标准养护室中脱模养护至28d,每次试验

表2 混凝土配合比设计

kg/m³

试验组号	材料组成						
	水泥	硅灰	石英砂	玻璃砂	石英粉	钢纤维	水
1	850	195.5	467.5	467.5	331.5	148.75	161.5
2	850	195.5	935	0	331.5	223.55	161.5
3	850	195.5	467.5	467.5	331.5	148.75	161.5
4	850	195.5	0	0	331.5	148.75	178.5
5	850	195.5	935	0	331.5	148.75	178.5
6	850	195.5	467.5	467.5	331.5	223.55	178.5
7	850	195.5	467.5	467.5	331.5	223.55	144.5
8	850	195.5	935	0	331.5	74.8	161.5
9	850	195.5	467.5	467.5	331.5	74.8	178.5
10	850	195.5	935	0	331.5	148.75	144.5
11	850	195.5	467.5	467.5	331.5	148.75	161.5
12	850	195.5	467.5	467.5	331.5	148.75	161.5
13	850	195.5	467.5	467.5	331.5	148.75	161.5
14	850	195.5	467.5	467.5	331.5	74.8	144.5
15	850	195.5	0	935	331.5	74.8	161.5
16	850	195.5	0	935	331.5	223.55	161.5
17	850	195.5	0	935	331.5	148.75	144.5

制备3份重复样品,并以相应测试平均值作为UHPGC力学性能代表值。

1.4 试验流程

(1)坍落度试验。新拌混凝土的坍落度试验用于评估所有混凝土混合料的工作性能。操作程序按GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》进行。

(2)抗压试验。根据GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行抗压强度试验,试验采用100mm×100mm×100mm的混凝土立方体试块,本次养护时间为14d,每组配比制作3个试件。混凝土试件在2000kN万能试验机上以0.5MPa/s的加载速度进行试验,抗压强度由式(1)确定,试验加载如图1所示。

$$f_{cc} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中: f_{cc} 为混凝土立方体试件的抗压强度,单位为MPa; F 和 A 分别为试件的破坏荷载(N)和受压面积(mm²)。

(3)拉拔试验。通过使用1000kN的万能试验机在设计的钢架上进行拉拔试验。钢筋受力端在位移控制下承受单调拉伸荷载,在钢筋的自由端安装千分



图1 混凝土抗压测试

表4 坍落度测试结果

试验组号	变量水平组合			响应值
	X_1	$X_2/\%$	$X_3/\%$	
1	0.17	2	0	30
2	0.17	3	50	21
3	0.17	1	50	31
4	0.17	2	100	52
5	0.19	1	100	187
6	0.19	3	0	29
7	0.19	3	100	97
8	0.19	1	0	75
9	0.21	2	0	206
10	0.21	2	100	228
11	0.21	1	50	219
12	0.21	3	50	201
13	0.19	2	50	144

表, 测量记录钢筋的滑移量。钢筋与混凝土之间的平均粘结应力可通过式(2)计算。

$$\tau = \frac{F}{\pi dl} \quad (2)$$

式中: τ 为平均粘结应力; F 为钢筋上施加的力; d 为钢筋的直径; l 为钢筋的埋置深度(粘结长度)。

2 UHPGC 工作性能的多因素交互影响分析

本次试验在制备混凝土过程中分别进行了坍落度测试, 利用 Design-Expert 设计软件进行三因素(水胶比, X_1 ; 钢纤维体积掺量, X_2 ; 玻璃砂替换率, X_3)三水平箱式 Box-Behnken 设计。变量因素的真实值和代码值见表3。

表3 变量水平真实值和代码值

代码值	真实值		
	X_1	$X_2/\%$	$X_3/\%$
-1	0.17	1	0
0	0.19	2	50
1	0.21	3	100

X_1 (0.17, 0.19, 0.21)、 X_2 (1%, 2%, 3%)、 X_3 (0%, 50%, 100%) 为自变量的取值, 坍落度 Y_1 作为响应值。每组试验采用3个试件, 取其相应的平均值作为代表值。试验结果见表4。自变量与响应值之间的关系使用三维响应曲面图进行分析。当固定一个变量取中间值时, 三维图展示另外两个变量对响应值的影响。

水胶比、钢纤维体积掺量、玻璃砂替换率与坍落度之间的三维曲面交互响应关系如图2所示, 水胶比、玻璃砂替换率与坍落度呈正相关关系, 钢纤维体积掺量与坍落度呈负相关。即水胶比和玻璃砂替换率增大, UHPGC 的工作性能提高, 钢纤维体积掺量越大, UHPGC 的工作性能下降。其中, 水胶比增大可提高混凝土的工作性能是显而易见的, 玻璃砂由于其吸水率低于石英砂, 并且玻璃砂的表面结构更光滑, 所以玻璃砂替换率增加, UHPGC 的工作性能也会显

著提升。钢纤维的增加导致与纤维粘结的水泥浆体面积增大, 混凝土的流动性受到限制, 坍落度值降低, UHPGC 的工作性能下降。

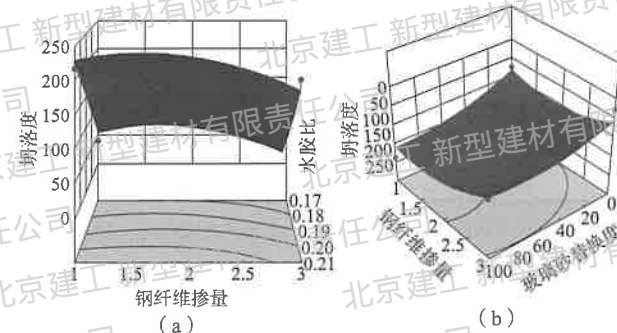


图2 材料变量-坍落度三维响应曲面图

(a) 水胶比、钢纤维体积掺量与坍落度; (b) 钢纤维体积掺量、玻璃砂替换率与坍落度

从图2还可以发现, 钢纤维的体积掺量从1%增加到2%对混凝土的工作性能影响没有从2%增加到3%的影响大, 当钢纤维体积掺量从2%提高到3%, UHPGC 的工作性能下降较快, 因此, 从经济性和工作性能可得到钢纤维的体积掺量为2%为最佳掺量。

3 UHPGC 和 HRB600 钢筋粘结性能的多因素交互影响分析

3.1 粘结强度分析

水胶比、钢纤维体积掺量、玻璃砂替换率与粘结强度之间的三维曲面交互响应关系如图3所示。

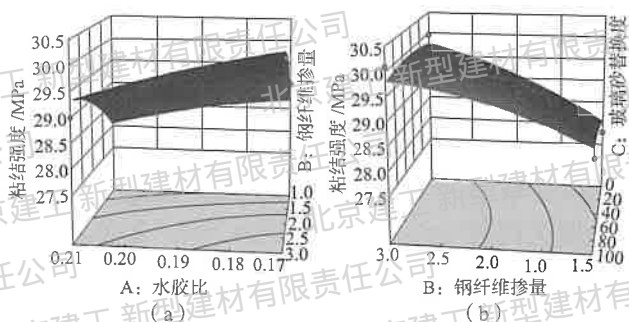


图3 材料变量-粘结强度三维响应曲面图

(a) 水胶比、钢纤维掺量与粘结强度; (b) 钢纤维掺量、玻璃砂替换度与粘结强度

从图3可以看出,随着水胶比的增大,粘结强度减小,水胶比从0.17增加到0.21,粘结强度从29.24 MPa减小到27.72 MPa。水胶比越大,粘结强度越小,劈裂强度越小,导致混凝土在粘结滑移过程中,抵抗钢筋滑移产生的混凝土开裂变形的能力降低。另外,由于水胶比减少,UHPGC与HRB600的粘结界面的泌水减少,降低了界面区的孔隙率,提高了密实度,改善了界面结构。同时,硅灰的加入以及水胶比的减少,在一定程度上制约了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和Aft晶体的长大,改变或减小其取向性,生成了更多C-S-H凝胶,提高了UHPGC与HRB600的接触面积,从而提高了粘结强度。

随着钢纤维体积掺量的增加,粘结强度增大,钢纤维体积掺量从1%增加到3%,粘结强度从28.15 MPa增长到29.84 MPa。钢纤维加入混凝土中以后,可阻止和延缓混凝土裂缝的发生和发展,使混凝土的抗拉强度明显提高,而混凝土的抗拉强度是影响粘结强度的一个重要因素,所以加入钢纤维后可显著提高粘结强度。由结果可知,当水胶比和玻璃砂替换度不变时,钢纤维体积掺量增加,粘结强度增加程度比抗压强度增加程度高。当钢纤维体积掺量从2%增加到3%后,粘结强度的提高趋于平缓,表明钢纤维的增强效果与其掺量并不是线性增加的关系,原因在于随着纤维体积掺量的增加,混凝土抗拉强度的增加速率明显减小。钢纤维体积掺量越大,在水泥浆体中的分散难度也越大,其新拌混凝土的捣实也更困难,导致纤维无法最大限度地发挥其增强作用。基于本次试验结果,从经济性及强度两方面考虑,将最佳钢纤维体积掺量确定为2%。

玻璃砂替换率对粘结强度和抗压强度的影响规律基本相似,即粘结强度随着玻璃砂替换率的增加先增大后减小。玻璃砂替换率主要通过影响混凝土的强度影响钢筋和UHPGC的粘结强度,玻璃砂由于自身的

更高压碎值提高了UHPGC的抗压强度和劈裂强度,进一步提高了混凝土的粘结性能。

3.2 粘结强度和抗压强度的相关关系

抗压强度和粘结强度关系如图4所示。从图4可以看出,13组试验结果的抗压强度排列曲线和粘结强度排列曲线趋势基本一致,这表明混凝土和钢筋之间的粘结强度和混凝土自身的抗压强度具有密切关系,且呈正相关,即混凝土自身抗压强度越高,与钢筋之间的粘结强度越大。这是因为在拉拔试验中,带肋钢筋在混凝土中发生滑移,混凝土会抵抗钢筋的滑移,其自身强度起到重要的作用,其抗压强度和劈裂强度与此密切相关,混凝土在钢筋滑移过程中先产生小裂缝,后期产生大裂缝,最后因自身强度抵抗不了钢筋的滑移,发生劈裂破坏。这个粘结滑移过程主要是由混凝土自身强度和钢筋的抗拉强度去抵抗滑移过程的拉拔力,因此混凝土抗压强度与粘结强度成正比比例。

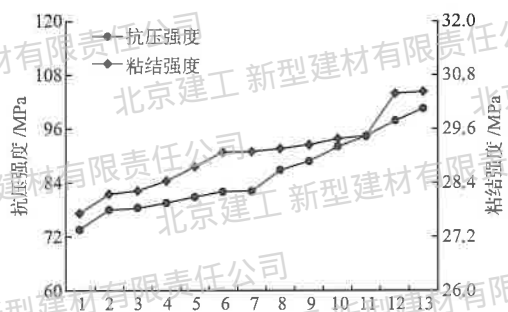


图4 抗压强度和粘结强度关系

4 粘结滑移机理分析

4.1 试验破坏模式

本次进行了13组拉拔试验,共41个试件,每个试件都会在拉拔过程中有不同的滑移量、起始滑移时间、起始滑移荷载、极限荷载和最大粘结强度,并呈现出不同的破坏特征,主要表现为劈拉破坏。

劈拉破坏模式表现为钢筋在混凝土中的滑移较大,为0.5~14 mm,混凝土裂缝多,没有劈裂破坏裂缝宽,拉拔试验最后会缓慢下降停止。在粘结滑移曲线上表现为开始滑移时间较晚,起始滑移荷载较大,曲线有很长下降段。这是因为发生破裂破坏的混凝土强度较大,钢纤维掺量高,在粘结滑移过程中抵抗钢筋滑移的能力强,混凝土刚开始出现小裂缝,在滑移过程中裂缝再次开展,混凝土最终发生破坏。

4.2 粘结滑移曲线

通过41个试件的拉拔试验,最终整理试验数据,得到每个试件的粘结滑移曲线,通过粘结滑移曲线分

析 UHPGC 和 HRB 600 二者的粘结机理。

图 5 和图 6 是粘结滑移曲线和时间-粘结强度/滑移量曲线。根据粘结滑移曲线的斜率和变化,以及粘结机理,将劈拉破坏的试件粘结曲线分为微滑移段、滑移段、加速滑移段和下降段 4 个阶段。

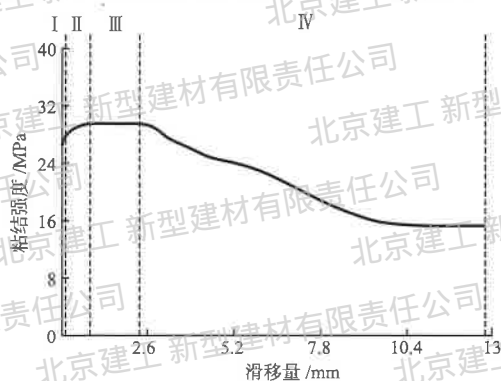


图5 试件粘结滑移曲线

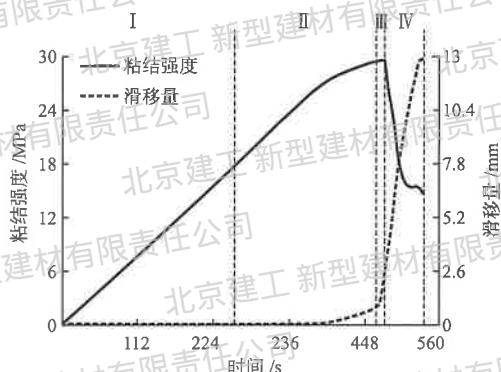


图6 试件时间-粘结强度/滑移量曲线

(1) 微滑移段是试验开始加载到钢筋产生 0.001 mm 滑移量, 粘结滑移曲线这一段与横轴垂直。根据混凝土的配合比不同, 导致混凝土的强度不同, 所以这段的分界点即起始滑移时间和起始滑移荷载各不相同。这一阶段钢筋和混凝土的粘结力主要有摩擦力和化学附着力组成, 混凝土中没有裂缝产生。

(2) 滑移段是钢筋开始滑移到到达极限荷载之前, 在这一段粘结滑移曲线是近似的直线段。开始滑移后初期, 滑移速度较慢, 这一段的滑移量基本都在 1 mm 以内, 滑移时间很长, 因为持续到荷载几乎快达到极限荷载值。这一阶段钢筋和混凝土的粘结力主要有摩擦力和机械咬合力组成, 混凝土里面开始有微小裂缝产生。

(3) 加速滑移段是达到极限荷载前后的一段时间, 粘结滑移曲线这一段近似一个抛物线形。这段的持续时间较短, 滑移量为 2~3 mm, 因为快到达极限荷载的时候, 混凝土有大裂缝开展, 抵抗钢筋滑移的能力也快到极限, 钢筋开始加速滑移。这一阶段钢筋和混凝土的粘结力主要也是由摩擦力和机械咬合力

组成, 混凝土开始有大裂缝发展。

(4) 下降段是荷载开始卸载后到试验停止时间, 粘结滑移曲线这一段是不规则的斜向下曲线。这段持续时间不长, 但是滑移量很大, 达到 6~10 mm。达到极限荷载后, 混凝土大裂缝发展, 混凝土的强度不足抵抗钢筋的滑移, 荷载开始下降, 钢筋滑移较多, 最后混凝土发生破坏, 试验停止。

5 结论

通过对 UHPGC 与 HRB 600 钢筋的粘结强度和粘结滑移曲线的分析, 探讨了两者的粘结性能影响因素和粘结滑移机理特征, 得出以下结论。

(1) 通过试件制备过程测试坍落度, 玻璃砂替换度越大, 工作性能越好, 验证玻璃砂提高混凝土的工作性能。

(2) 水胶比和钢纤维体积掺量与粘结强度呈正相关关系, 玻璃砂替换度随着掺量增加, 粘结强度呈现先增长后减小的趋势, 同时试验得到抗压强度和粘结强度呈线性关系。

(3) UHPGC 和 HRB 600 钢筋的粘结滑移曲线良好, 破坏形式主要为劈拉破坏, 粘结滑移曲线分为 4 个阶段, 即微滑移阶段、滑移段、加速滑移段、下降段。

参考文献

- [1] 陈慧. 活性粉末混凝土和光圆钢筋的粘结滑移研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [2] 刘玲利. 变形钢筋与钢纤维全轻混凝土粘结性能试验研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [3] 刘平, 李艳艳, 刘坤. HRB 500 钢筋粘结性能的试验与分析 [J]. 河北工业大学学报, 2012, 41(1): 76-80.
- [4] 贺彩峰, 周朕, 呼洋, 等. HRB 500 钢筋在工程中的应用效益分析 [J]. 建筑施工, 2021, 43(12): 2661-2663.
- [5] 崔超静. HRB600 级高强钢筋与混凝土协同工作性能研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
- [6] 张颖. HRB500 钢筋与活性粉末混凝土粘结性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2017, 44(11): 63-66.
- [7] 郭艳红. 锈蚀 HRB600 高强钢筋与高强混凝土粘结性能研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- [8] 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.
- [9] 何化南, 陈西嫻, 杨媛媛. 不同钢筋位置下锈蚀钢筋混凝土梁粘结性能分析 [J/OL]. 哈尔滨工程大学学报: 1-11[2023-08-17]. <http://kns.cnki.net/koms/detail/23.1390.U.20230721.0941.004.html>
- [10] 张众. 高温后钢筋与钢纤维火山渣混凝土粘结性能试验研究 [D]. 长春: 吉林建筑大学, 2022.
- [11] 吴少华. 高温后钢筋与硫酸盐侵蚀玄武岩纤维混凝土的粘结性能试验研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [12] 秦拥军, 卢义, 许富威, 等. 掺钎渣再生混凝土与钢筋粘结性能的试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2020, 47(11): 98-102.
- [13] 陈建华. 高温后钢筋与聚合物水泥砂浆粘结性能试验研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2020.