

文章编号: 1001-4888(2018)02-0209-10

高温后钢筋与混凝土粘结性能 试验与损伤机理分析^{*}

周子健¹, 霍静思^{1,2}, 金宝^{1,3}

(1. 湖南大学 教育部建筑安全与节能重点实验室, 长沙 410082; 2. 华侨大学 土木工程学院, 厦门 361021;

3. 中国五环工程有限公司, 武汉 430070)

摘要: 钢筋与混凝土的高温粘结性能是研究钢筋混凝土结构抗火性能的基础, 通过制作 15 个立方体混凝土试块和 11 个中心拉拔粘结锚固试件, 分别进行 200~800℃ 高温后抗压试验和拔出试验, 研究了经历不同温度后混凝土抗压强度和与钢筋粘结性能的变异情况。对历年来高温后混凝土粘结试验数据进行了统计分析, 并通过有限元拟合对试验温度场进行了修正, 总结了高温后钢筋与混凝土粘结性能的退化规律和影响因素, 同时对比了高温后粘结强度与混凝土抗压强度、弹性模量和抗拉强度的相关性。基于现有高温后混凝土材料微观试验结果, 从微观结构层面解释了宏观粘结性能变化规律, 并分析了高温后粘结性能微观损伤机理。结果表明: 高温后钢筋与混凝土的粘结强度随着温度升高呈现下降的趋势, 且与高温后混凝土抗拉强度衰减规律相近。同时, 高温后混凝土残余粘结强度与混凝土高温微观结构密切相关, 与水泥凝胶体 HCP 孔隙率之间具有良好的相关性。

关键词: 高温后; 钢筋混凝土; 粘结性能; 统计分析; 微观损伤机理

中图分类号: TU375

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-283

0 引言

在实际工程中, 火灾一直是钢筋混凝土结构面临的主要威胁之一。在火灾作用下, 不仅钢筋混凝土结构内部形成不均匀温度场, 导致温度应力及温度变形的产生, 而且钢筋和混凝土本身的化学成分、物理结构等均发生显著变化, 两者的耦合作用对结构的极限承载力、裂缝及变形发展均有重要影响^[1-8]。而钢筋与混凝土之间的粘结是保证这两种力学性能完全不同的材料共同工作的基本前提, 因此, 高温后钢筋与混凝土粘结性能研究对于保证结构火灾安全、评估其抗火性能及制定合理的火灾后修复加固策略, 具有重要理论意义和工程实用价值。

近年来, 国内外学者对高温后钢筋和混凝土的力学性能、热工性能和粘结性能开展了一系列试验研究, Morley 和 Royles^[9,10]早在 1980 年就对光圆钢筋和变形钢筋分别进行了高温后粘结试验和声发射检验, 得到了经历不同高温后粘结强度的变化; 朱伯龙等^[11]进行了 40 个试件在常温、高温下和高温后的粘结试验, 发现在较低温度(螺纹钢 300℃, 光圆钢 200℃)时, 粘结强度有所提高。周新刚等^[12]、牛向阳等^[13]、唐瑞瑞等^[14]、Arel 等^[15]根据实测的高温后钢筋与混凝土粘结滑移曲线, 分别讨论了混凝土强度、相对保护层厚度、锚固长度、钢筋直径、冷却方式、配箍率对高温后粘结性能的影响; 王孔藩等^[16]和

^{*} 收稿日期: 2016-12-23; 修回日期: 2017-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(51378200)资助

通讯作者: 霍静思(1970—), 男, 博导, 教授。主要从事结构抗火和连续倒塌等研究。Email: jingsihuo@gmail.com

Haddad 等^[17]通过双向对拔试验,得到了不同钢筋直径和表面形式对粘结强度高温退化规律的影响;袁广林等^[18]和 Bingöl 等^[19]对不同冷却方式下的钢筋混凝土粘结性能进行试验研究,分析了不同条件下粘结滑移曲线和极限粘结应力。在混凝土材料高温微观损伤机理研究方面,金宝等^[4,5]通过热重试验、扫描电镜试验和压汞试验对高温后钙质骨料混凝土进行了微观试验研究,得到了不同温度区段混凝土强度与微观结构变化的关系。

但由于影响粘结性能的因素众多,损伤机理复杂,且高温试验方法不一,目前在高温后钢筋与混凝土粘结性能退化规律、微观粘结破坏机理等方面尚未形成全面、深入的研究。此外,目前各个学者在试验分析中主要研究因素为混凝土强度、锚固长度等^[9-19],而对于高温粘结试验中采用的升温制度方面的研究尚未见报道,同时各学者在试验分析中均直接采用设定温度进行分析,这也是不合适的。因此,参考已有学者的研究成果,本文通过中心拉拔粘结试验,补充现有高温后钢筋与混凝土粘结性能研究数据;同时对国内外涉及高温后钢筋与混凝土粘结性能的试验研究文献进行统计,并基于有限元温度场分析对试验温度场修正,总结高温后钢筋与混凝土粘结性能的退化规律和影响因素,分析高温后粘结强度与混凝土抗压强度、弹性模量和抗拉强度的相关性;最后基于现有混凝土材料微观试验结果,从混凝土微观结构层面来解释宏观粘结性能变化规律,从微观损伤学角度分析钢筋与混凝土粘结破坏机理。

1 试验概况

1.1 试验设计与试件制作

混凝土设计强度等级为 C30,水泥采用强度等级 42.5 的普通硅酸盐水泥,粗骨料为粒径 5~15mm 的石灰岩碎石,细骨料为天然河砂,试验配合比为水:水泥:砂:石=0.51:1:1.65:2.81,28d 立方体抗压强度为 37.9MPa。试验所用钢筋为直径 $\Phi 16$ 的 HRB400 级变形钢筋,混凝土和钢筋材性试验结果如表 1 所示。

试验形式为中心拉拔试验,试件尺寸如图 1 所示,试件的制作参照《混凝土结构试验方法标准》(GB50152—92)^[20],浇筑完并标准养护 28d 后进行试验。试验旨在得到高温后钢筋与混凝土的粘结强度,共设计 4 个温度变量,分别为 200℃、400℃、600℃、800℃,常温下的试验作为对比组。

表 1 材性试验结果

Tab. 1 Mechanical indexes of steel and concrete after elevated temperature

T /℃		常温	200	400	600	800
钢筋 $\Phi 16$	E_s /GPa	193.2	192.6	188.2	198.8	196.1
	f_y /MPa	516.1	494.5	461.4	394.9	275.1
	f_u /MPa	626.6	605.4	577.1	490.7	470.4
砼 C30	f_{cu} /MPa	37.9	38.7	37.5	21.6	13.8

注:(1)最高温度下持续时间为 5h;(2)表中数据为 3 个试样的平均值。 E_s 为钢筋弹性模量; f_y 为钢筋屈服强度; f_u 为钢筋极限强度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度。

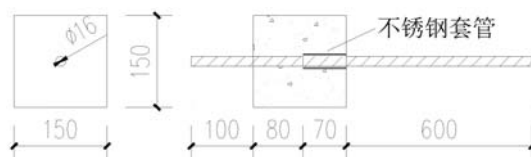


图 1 试件几何尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of specimens (unit: mm)

1.2 试验装置及试验方法

试验采用水平拉伸试验梁式转换装置^[21],利用 RSC5050 型 500kN 千斤顶进行加载,如图 2 所示。

由于钢筋与混凝土的粘结破坏主要为混凝土剪切破坏,极限滑移较小,加载过程平顺性较好,因此采用位移控制的加载制度,试验正式加载前进行预加载,之后以 0.2mm/min 的速度施加荷载,当自由端滑移达到 3mm 时,认为此时已达到完全破坏,试验结束。采用扬州科动生产的 KD9000A 型应变式位移计布置于钢筋的自由端以测量滑移量,数据的记录和处理均由东华测试生产的 DH3815N 静态应变测试系统完成。

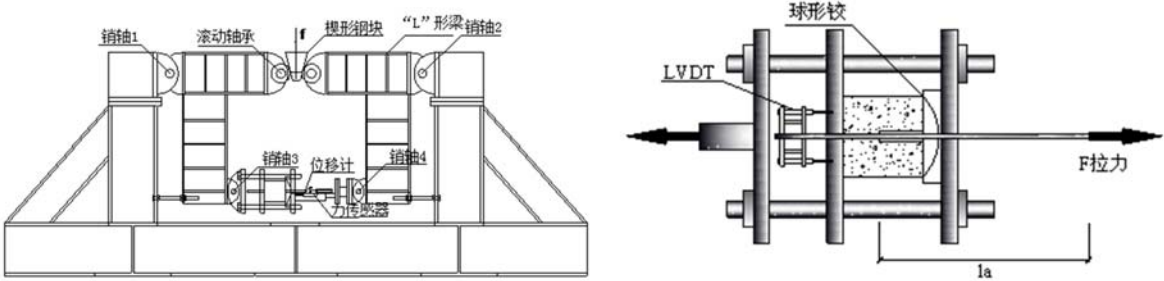


图 2 试件加载装置示意图

Fig. 2 Test setup

升温设备采用电加热高温试验炉,炉膛内径 1000mm,高 1200mm,最高温度 1200℃,由 KSY-6D-T 型温度控制仪来升温 and 控温,温度控制精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。考虑实际火灾中钢筋处于混凝土内部与外部明火隔离,采用防火棉对试块外钢筋进行包裹,处理结束后将试件放至电阻炉内进行升温。已有研究表明,不同的升温速率($2\sim 50^{\circ}\text{C}/\text{min}$)下均可以采用相同的分析模型^[22],但不同的恒温时间对高温后混凝土残余抗压强度有较大的影响,恒温时间较短时,试件内部无法达到预定温度值且温度分布不均匀^[23,24],因此参考以往文献试验方案,采用 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升至设定温度后恒温 5h,之后切断电源打开炉门,待炉膛温度降至室温后取出试块,2d 后进行中心拉拔试验。

2 试验结果与分析

表 2 给出了高温后试件拉拔试验结果,对于所有 5 组不同温度条件下的试件,常温、 200°C 、 400°C 试件的破坏形式均为混凝土劈裂破坏,即在加载过程中,试件突然劈裂,荷载迅速降低至零点; 600°C 和 800°C 组试件均为钢筋拔出破坏,即在加载过程中,混凝土始终未发生劈裂现象,无明显裂缝产生。

表 2 高温后试件拔出试验结果

Tab. 2 Pull-out test results of specimens after high temperature

T / $^{\circ}\text{C}$	破坏形式	峰值荷载 /kN	峰值荷载 均值 /kN	粘结强度 /MPa	峰值滑移 /mm	峰值滑移 均值 /mm
20	劈裂	80.5	74.1	18.4	1.01	1.04
		70.6			1.02	
		71.1			1.08	
200	劈裂	58.0	55.5	13.8	1.04	1.04
		53.0			1.06	
400	劈裂	34.8	33.5	8.3	1.11	1.12
		32.1			1.13	
600	拔出	3.2	3.4	0.8	1.31	1.17
		3.6			1.02	
800	拔出	0.8	0.9	0.2	0.69	0.67
		0.9			0.65	

2.1 $\tau-s$ 曲线

图 3 为所有试件的粘结应力 τ 和钢筋自由端相对滑移 s 的关系曲线($\tau-s$ 曲线)。由图 3 可以看出,对于高温后粘结试件,随温度升高,曲线的峰值下降,即极限粘结强度下降;同时 $\tau-s$ 滑移曲线斜率

减小,即粘结刚度下降。

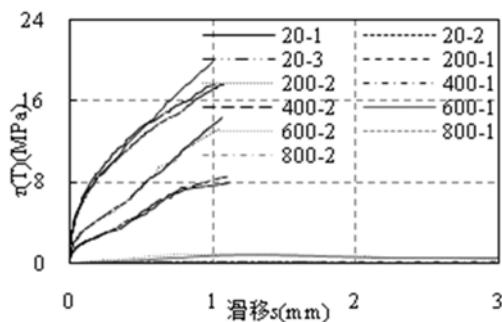


图 3 各温度下试件粘结—滑移曲线

Fig. 3 Bond-slip curves of specimens after elevated temperature

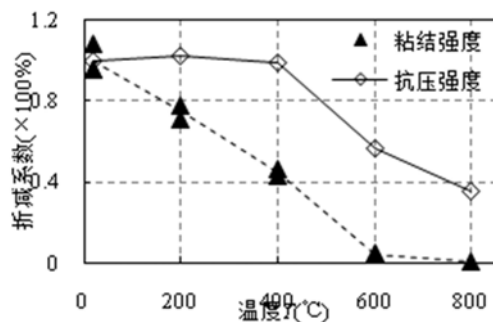


图 4 粘结强度和混凝土抗压强度折减系数—温度曲线

Fig. 4 Bond strength & concrete compressive strength reduction coefficient-temperature curves

2.2 极限粘结强度和极限滑移

将高温后粘结强度和混凝土抗压强度同时示于图 4 中,由表 2 和图 3、图 4 可以看出,与常温下试件相比,随着试验温度的提高,钢筋与混凝土的粘结强度持续降低,特别是超过 400℃后,粘结强度下降剧烈;当温度达到 600℃时,极限粘结应力与常温下相比下降了 90%以上。

由表 2 可知,与常温试件相比,随着温度升高,极限滑移有所增大,但增大幅度不多。同时对于 800℃试件,因其粘结强度过低,试件过早破坏,极限滑移也有较大幅度的减小。

3 试验统计与分析

3.1 试验统计

国内外学者对高温后钢筋与混凝土粘结性能开展了大量的试验研究,表 3 统计了历年来国内外学者开展的高温后带肋钢筋与混凝土粘结性能的试验情况。由于高温后钢筋与混凝土粘结性能的影响因素众多,本文主要考虑了试件尺寸、混凝土抗压强度、钢筋直径、锚固长度、配箍率、试验龄期、升温制度、冷却方式和静置时间等不同试验条件对试验结果的影响。表 3 中所列混凝土抗压强度均统一换算成 150mm 标准立方体抗压强度,100mm 立方体、Φ6in×12in 圆柱体换算系数分别为 0.95 和 1.2。

虽然高温后钢筋与混凝土粘结性能受到多方面复杂因素的制约,但在高温衰减规律上还是取得了较为一致的结论,根据已有文献中各学者对于众多影响因素的分析讨论,本文概括性地将其分为三大类:

第一类是钢筋的自身特性与配置,即钢筋直径及外形、抗拉强度、锚固长度、箍筋配置等因素。钢筋对高温后粘结强度的影响是多方面的,对于钢筋直径较大的试件,相对肋高降低, c/d (c 为保护层厚度, d 为钢筋直径)降低,粘结强度降低^[12,14];对于光圆钢筋,其与混凝土的粘结力主要由混凝土中的水泥凝胶体 HCP 与钢筋表面之间的化学胶着力和摩擦力组成,而变形钢筋则主要取决于钢筋表面凸肋与混凝土的机械咬合力,因此光圆钢筋受高温的影响要比变形钢筋大得多^[12,14,26];对于钢筋强度和锚固长度方面,研究表明钢筋强度对粘结强度影响不大^[13],当锚固长度较大 ($l_a/d > 10$) 时,锚固长度也对粘结强度无明显影响^[6,13];对于配箍试件,由于箍筋对混凝土破坏锥体形成有效约束,粘结强度提高明显^[6,13,30]。

第二类是混凝土的自身特性,即强度等级、骨料种类、矿物掺加料、养护条件、试验龄期和保护层厚度等因素。试验表明,粘结强度与混凝土抗压强度成非线性正比关系^[6,13,30]。金宝等^[5]所做的高温后抗压强度数据统计表明,低水灰比、钙质骨料、粉煤灰和矿渣掺料均对混凝土的高温性能有利。对于常温下相对保护层厚度 c/d 较小的试件,混凝土对钢筋的横向约束较小,混凝土易发生劈裂破坏;随着 c/d 增大,粘结强度增大,破坏形式变为拔出破坏;同时高温后试验表明,随着保护层厚度增加,内部核心区温度越低,高温后粘结强度越高^[2,12,14]。

第三类是高温加热及冷却制度,即升温速率、恒温时间、冷却方式、静置环境和静置时间等。目前针对升温速率和恒温时间方面的研究还比较少见,但由混凝土截面温度场分布^[2]可以推测,升温速率越快,试件内部温差引起的温度应力越大,对粘结强度有不利影响;同理可以对恒温时间的影响进行推测,恒温时间越长,内部温度越接近炉内温度,对粘结强度越不利。研究表明,喷水冷却相比自然冷却加剧了混凝土的脆性破坏,极限粘结强度及对应的极限滑移均大幅度降低^[18,19]。高温后混凝土残余抗压强度主要经历下降—回升—稳定 3 个阶段,因此对粘结强度也有同样的影响^[31]。

表 3 高温后带肋钢筋与混凝土粘结性能试验统计

Tab. 3 Experimental results database

试验者	试件尺寸 /mm	抗压强度 /MPa	钢筋直径 /mm	锚固长度 /mm	配箍 /mm	试验 龄期 /d	升温制度 /(℃/min, min)	冷却 方式	静置 时间 /d
本文试验	150×150×150	44.9	16	80	否	120	10, 300	F	2
Morley ^[9]	Φ126×300	33.3	16	32	否	—	2, 60	A	1
Royles ^[10]	Φ126×300	—	16	32	否	90	2, 60	F	—
朱伯龙 ^[11]	130×130×130	30	20	40	否	—	—, 30	A	2
周新刚 ^[12]	100×100×100	33.8	14/16/22	56/64/88	否	28	—, 120	F	—
牛向阳 ^[13]	100×100×210	31.3	16	160	否	—	—, 360	A	—
唐瑞瑞 ^[14]	100×100×100	56.1	14/20	70	否	—	10, 360	F	—
Arel ^[15]	150×150×150	38.5	14	70	否	28	5, 180	F	—
王孔藩 ^[16]	100×100×400 *	—	16	175	Φ8	—	ISO, 120	A	30
Haddad ^[17]	100×100×400 *	73.4	10/20	150	Φ8	35	2, 120	F	—
袁广林 ^[18]	100×100×150	35	16	100	Φ6	—	10, 45	A/W	7
Bingöl ^[19]	Φ100×200	55.8	8	60/100/160	否	28	12~20, 180	A	1
徐泽晶 ^[25]	100×100×100	27.2	12	80	Φ4	—	ISO, 120	A	30
吴昊 ^[26]	100×100×100	38.2	10	100	否	—	1.67, 120	A	20
Hassan ^[27]	150×150×150	33.7	20	60	否	28	—, 60	A	20h
Lublóy ^[28]	Φ120×100	61.4	12	40	否	28	—, 120	A	—
吕兆龙 ^[29]	100×100×100	41.1	12/16/20	60/80/100	否	28	10, 120	—	—

注:表中各注释标记解释如下,试件尺寸中上标“*”处为双向对拔试验;冷却方式中“F”处表示放置炉内自然冷却,“A”处表示放置空气中自然冷却,“W”处表示喷水冷却;升温制度分别表示升温速率和恒温时间。

3.2 试验分析

图 5 收集了历年来高温后粘结强度折减系数—温度关系的试验结果,可以看出不同学者得到的粘结强度折减系数随温度的变化规律有所差异。其中,大部分数据(15 个系列)均表现出一致的衰减规律,即在 100~300℃之间相对残余粘结强度随温度升高一直缓慢降低,而在 300~500℃之间出现转折点,之后相对残余抗压强度值下降剧烈。个别数据(文献[9,10])表现为:先在 100℃时降低,在 200~300℃左右相对残余粘结强度有所恢复,之后随温度升高快速衰减。

如图 5 所示,本文试验数据处于整体数据的下界,相对残余粘结强度衰减曲线转折点在 400℃左右。结合本文的试验条件,认为这可能是由于:(1) 本文试验时试件龄期较长,试件内部水化程度较高,因此高温作用下残余水泥颗粒的二次水化作用较弱。(2) 试验采用的升温速率较快且恒温时间较长,进一步加剧了粘结区段混凝土的损伤程度。

为进一步分析升温制度对试验结果的影响,采用文献[32]中的 ABAQUS 有限元模型和参数,建立

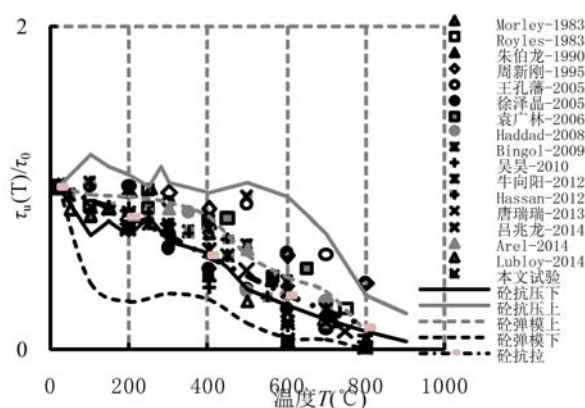
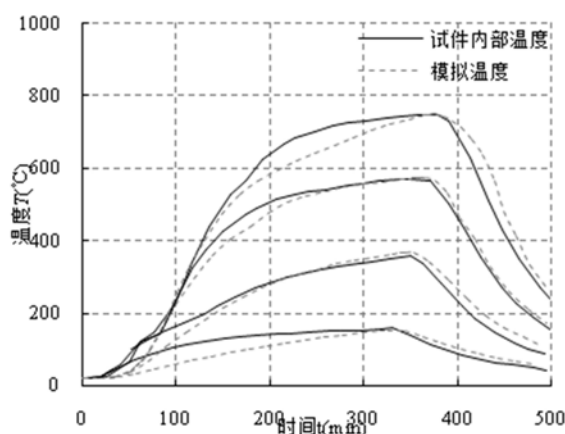


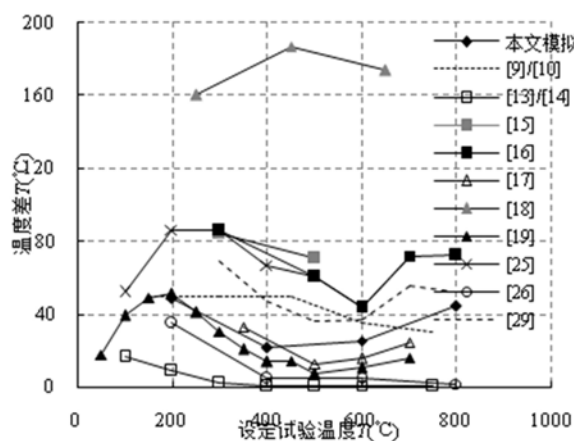
图 5 高温后粘结强度衰减规律统计

Fig. 5 Comparisons of bond strength coefficients from tests and previous data

一致的结论,将温度误差在 50℃ 以上的试验数据进行修正,以消除因升温制度导致的试验误差,修正后的高温后粘结强度数据统计如图 7 所示。可见,修正后的高温后粘结强度数据离散性有所减小,且整体趋势向下偏移。



(a) 实测温度-时间关系曲线与模拟结果对比



(b) 核心区混凝土经历最高温度与预定温度差值对比

图 6 截面温度场有限元模拟

Fig. 6 Finite element simulation of thermal distribution

图 5 及图 7 同时给出了文献[5,32]统计的历年来的各学者试验得到的高温后混凝土抗压强度、弹性模量数据点的上、下包络线以及文献[33]给出的高温后混凝土抗拉强度退化曲线,可以看出高温后混凝土粘结强度衰减趋势相较于混凝土抗压强度衰减趋势偏低,相较于混凝土弹性模量衰减趋势偏高,而与混凝土抗拉强度衰减趋势最为相近,这主要是因为粘结应力主要引起混凝土产生环向拉应力,因此高温后粘结强度更多取决于混凝土抗拉强度,而与抗压强度和弹性模量关系不大。

4 粘结性能微观损伤机理分析

钢筋与混凝土之间的粘结力主要由化学胶结

混凝土试件的截面温度场,并将模拟结果与实测结果进行对比(图 6(a))。可以看出,模拟结果与实测结果吻合良好,验证了该有限元分析模型的正确性。在温度场模型确定的基础上,根据表 3 所列参数,对其他试验的试件截面中心所经历的最高温度进行了数值模拟,如图 6(b)所示。由图 5 与图 6(b)对比可见,残余粘结强度与试件核心区真实温度显著相关,部分试件核心区最高温度与预定温度相差较大,相应的残余粘结强度也靠近整体上限,升温制度的不同加剧了试验数据的离散性。因此,直接采用设定温度对数据进行分析显然是不合适的,为了从离散的数据中得出更加

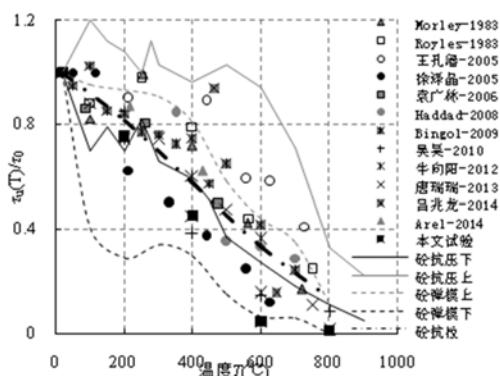


图 7 修正后的高温后粘结强度数据统计

Fig. 7 Revised statistics of bond strength from tests and previous data

力、摩擦力和机械咬合力三部分组成,通过将宏观力学性能试验与微观试验相结合起来进行对比分析,有助于更客观地认识在宏观力学性能层面相对较离散的研究结果。

如图8所示,在常温状态下,钢筋与混凝土粘结锚固机理已有比较统一的认识,Goto^[34]提出的内部斜裂缝模型形象地展示了钢筋与混凝土之间粘结力的传递机理。但在高温作用下,一方面混凝土本身包括组成成分和微观结构均发生不同程度的变化,另一方面由于钢筋和混凝土的线膨胀系数不同,两者随温度变化的热膨胀差值引起温度应力,加剧了裂隙的产生,两者的耦合作用共同决定了高温后钢筋与混凝土的粘结性能^[35]。

单从混凝土物理微观结构变化来看,结合已有微观试验文献^[4]结果,图9分别为高温后混凝土粘结强度与HCP热重损失、HCP孔隙率和HCP最可几孔径(对应孔径范围内的孔隙最多)的关系曲线,与本文试验结果进行对比可以看出,高温后混凝土残余粘结强度与高温后HCP的热重损失、孔隙率和最可几孔径均有较好的相关性,特别是孔隙率的变化与试验结果具有良好的一致性。因此,孔隙率不仅直接反映了混凝土高温微观结构的变化,更可作为高温后混凝土残余粘结强度检测与评估的主要依据。

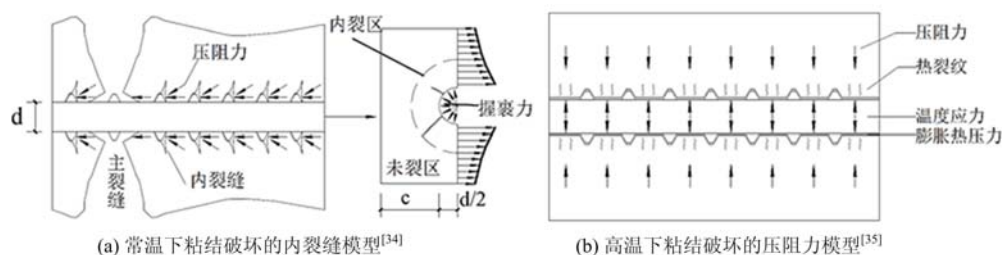


图8 常温及高温下粘结破坏机理

Fig. 8 Bond failure mechanisms at ambient and elevated temperature

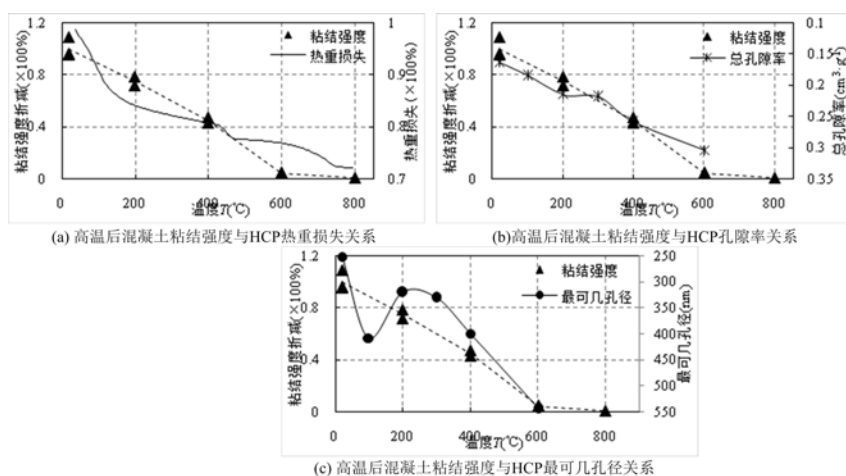


图9 高温后混凝土粘结强度与微观试验结果对比

Fig. 9 Comparison between residual bond strength of concrete and microscopic test results

从微观材料化学成分和物理结构综合来看,不同温度下钢筋与混凝土的粘结破坏可以分为以下几个阶段:(1)温度不超过400℃时,混凝土水化产物C-S-H在100~450℃之间缓慢脱水分解,部分发生形态变化,而且此阶段未水化的残余水泥颗粒的二次水化反应较弱,导致钢筋与混凝土表面化学粘结能力有一定程度下降;但此时部分C-S-H在200~400℃之间发生持续的水化反应,再加上钢筋与混凝土热膨胀引起的相互挤压力增大,粘结强度下降较少^[33,35,36]。(2)温度不超过600℃时,C-S-H发生持续水解,CH的层状结构开始遭到破坏,水泥浆中的总孔隙密度和孔径增加,界面微气孔和微裂缝显著发展,且高温后钢筋收缩,混凝土吸水膨胀,减小了两者之间的摩擦力和机械咬合力,粘结强度下降明显^[4,33]。(3)当温度大于600℃时,混凝土水化产物HCP快速脱水分解,骨料碳化变质,HCP与骨料粘结界面处裂缝急剧扩展,到800℃时,C-S-H脱水分解完全,粘结强度急剧下降,因此粘结强度在600℃时下降梯度最为明显^[4,14,33]。

5 结 论

(1) 高温后钢筋与混凝土的粘结强度随着温度升高而不断降低,对应极限滑移随温度升高有所增加,但在 800℃时由于粘结强度过低导致试件过早破坏,极限滑移又有所减小。高温后钢筋与混凝土粘结试件表现为两种破坏形式,随着温度升高由混凝土劈裂破坏逐渐转变为钢筋拔出破坏。

(2) 通过对历年来高温后粘结试验结果统计,发现升温制度对试件实际温度场具有显著影响,分析时应考虑构件实际温度场并进行修正。相比于混凝土抗压强度和弹性模量高温退化规律,高温后粘结强度衰减规律更趋近于混凝土抗拉强度衰减规律。

(3) 通过与微观试验结果对比分析,发现高温后混凝土残余粘结强度与混凝土高温微观结构密切相关,与 HCP 孔隙率之间具有良好的相关性。钢筋与混凝土粘结破坏可分为三个阶段,混凝土材料变化和高温引起的钢筋与混凝土之间的热膨胀差共同耦合作用,决定了高温后钢筋与混凝土的粘结强度。

参考文献:

- [1] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能[M]. 北京: 科学出版社, 2003 (WU Bo. Mechanical properties of reinforced concrete structures after fire[M]. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese))
- [2] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003 (GUO Zhenhai, SHI Xudong. High temperature performance of reinforced concrete and its calculation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003 (in Chinese))
- [3] 滕智明. 钢筋混凝土基本构件[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987 (TENG Zhiming. Basic components of reinforced concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1987 (in Chinese))
- [4] 金宝, 霍静思. 钙质骨料混凝土抗压强度的高温损伤机理[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2):359—363 (JIN Bao, HUO Jingsi. Damage mechanism of compressive strength of calcareous aggregate concrete after elevated temperature[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2):359—363 (in Chinese))
- [5] 金宝. 高温后混凝土材料的冲击力学性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015 (JIN Bao. Experimental study on dynamic behavior of concrete after exposure to high temperature under impact load [D]. Changsha: Hunan University, 2015 (in Chinese))
- [6] 徐有邻. 变形钢筋—混凝土粘结锚固性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1990 (XU Youlin. Experimental study of anchorage properties for deformed bars in concrete[D]. Beijing: Tsinghua University, 1990 (in Chinese))
- [7] ACI 408 Committee. Bond and development of straight reinforcing bars in tension (ACI 408R-03)[S]. American Concrete Institute, Detroit, Michigan, US, 2003.
- [8] Code CEB-FIP. Fib model code for concrete structures 2010[S]. Document Competence Center Siegmund Kästle, K., Germany, 2010.
- [9] Morley P D, Royles R. The influence of high temperature on the bond in reinforced concrete[J]. Fire Safety Journal, 1980, 2(4):243—255.
- [10] Royles R, Morley P D. Further responses of the bond in reinforced concrete to high temperatures[J]. Magazine of Concrete Research, 1983, 35(124):157—163.
- [11] 朱伯龙, 陆洲导. 高温(火灾)下混凝土与钢筋的本构关系[J]. 四川建筑科学研究, 1990(1):37—43 (ZHU Bolong, LU Zhoudao. Constitutive relationship between concrete and reinforcement under high temperature(fire) [J]. Sichuan Architecture Science Research, 1990(1):37—43 (in Chinese))
- [12] 周新刚, 吴江龙. 高温后混凝土与钢筋粘结性能的试验研究[J]. 工业建筑, 1995, 25(5):37—40 (ZHOU Xingang, WU Jianglong. Tests and analysis of bond performance between bars and concrete after exposed to high temperature[J]. Industrial Construction, 1995, 25(5):37—40 (in Chinese))
- [13] 牛向阳, 王全凤, 杨勇新, 等. 高温后普通混凝土与细晶粒钢筋粘结性能试验研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(3): 116—118 (NIU Xiangyang, WANG Quanfeng, YANG Yongxin, et al. Experimental study on bond-anchorage properties of fine grain steel bars in common concrete after high temperature[J]. Building Structure, 2012, 42(3): 116—118 (in Chinese))
- [14] 唐瑞瑞, 谢福娣, 刘栋栋. 高温后钢筋与混凝土粘结性能研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(增刊):1475—1478

- (TANG Ruirui, XIE Fudi, LIU Dongdong. Research of bond performance between bars and concrete after exposed to high temperature[J]. Building Structure, 2013, 43(S):1475—1478 (in Chinese))
- [15] Arel H S, Yazici S. Effect of different parameters on concrete-bar bond under high temperature[J]. ACI Materials Journal, 2014, 111(6):633—639.
- [16] 王孔藩, 许清风, 刘挺林. 高温自然冷却后钢筋与混凝土之间粘结强度的试验研究[J]. 施工技术, 2005, 34(8): 6—11 (WANG Kongfan, XU Qingfeng, LIU Tinglin. Experimental research on bonding strength between concrete and steel bar after cooled down from high temperature[J]. Construction Technology, 2005, 34(8):6—11 (in Chinese))
- [17] Haddad R H, Al-Saleh R J, Al-Akhras N M. Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete[J]. Fire Safety Journal, 2008, 43(5):334—343.
- [18] 袁广林, 郭操, 吕志涛. 高温后钢筋混凝土黏结性能试验研究[J]. 南京: 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(3):290—294 (YUAN Guanglin, GUO Cao, LV Zhitao. Experimental study on bond performance of reinforced concrete after being heated at high temperature[J]. Nanjing: Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2006, 34(3):290—294 (in Chinese))
- [19] Bingöl A F, Gül R. Residual bond strength between steel bars and concrete after elevated temperatures[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(6):854—859.
- [20] GB/T 50152—1992. 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992 (GB/T 50152—1992. Standard for test method of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992 (in Chinese))
- [21] 湖南大学. 一种可实现消除惯性力影响的落锤冲击拉伸试验梁式转换装置[P]. 中国专利: ZL2015207373597, 2016-01-20 (Hunan University. An inertia-force-eliminated conversion truss device for drop hammer impact tensile tests[P]. Chinese patent: ZL2015207373597, 2016-01-20 (in Chinese))
- [22] European Committee. Eurocode2: Design of concrete structures-Part 1-2: General rules-Structural fire design[S]. ENV 1992-1-2, 1995.
- [23] Wu Y, Wu B. Residual compressive strength and freeze-thaw resistance of ordinary concrete after high temperature[J]. Construction and Building Materials, 2014, 54:596—604.
- [24] 时旭东, 刘超, 李亮, 等. 亚高温持续作用混凝土受压强度试验研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(8):106—109 (SHI Xudong, LIU Chao, LI Liang, et al. Experimental study on compressive strength of concrete under lasting sub-high temperature[J]. Building Structure, 2011, 41(8):106—109 (in Chinese))
- [25] 徐泽晶. 火灾后钢筋混凝土结构的材料特性, 寿命预估和加固研究[D]. 大连理工大学, 2006 (XU Zejin. Experimental research on material characteristic and life pre-estimate and repairing of reinforcing concrete structure after fire[D]. Dalian University of Technology, 2006 (in Chinese))
- [26] 吴昊, 陈礼刚. 高温后钢筋混凝土粘结性能试验研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(2):105—108 (WU Hao, CHEN Ligang. Experimental investigation on bond performance between reinforcement and concrete after fire [J]. Industrial Construction, 2010, 40(2):105—108 (in Chinese))
- [27] Hassan S A. Effect of elevated temperatures on the bond strength of steel reinforcement and concrete enhanced with discrete carbon fibres[J]. Journal of Engineering and Development, 2012, 16(4):30.
- [28] Lublóy É, György B L. Temperature effects on bond between concrete and reinforcing steel[J]. Zbornik radova Građevinskog fakulteta, Subotica, 2014 (26):27—35.
- [29] 吕兆龙. 高温后钢筋与混凝土粘结锚固性能试验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014 (LV Zhaolong. Experimental studies on the bond-anchoring performance between reinforcing bars and concrete after high-temperature processing[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014 (in Chinese))
- [30] 牛向阳, 王全凤, 徐玉野, 等. 高温后 HRB 高强钢筋粘结锚固性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(9):84—87 (NIU Xiangyang, WANG Quanfeng, XU Yuye, et al. Experimental study on bond-anchorage properties of HRB high-strength steel bars in concrete after high temperature[J]. Industrial Construction, 2010, 40(9):84—87 (in Chinese))
- [31] 贾福萍, 王永春, 渠艳艳, 等. 冷却方式和静置时间对高温后混凝土残余强度影响[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(3):400—405 (JIA Fuping, WANG Yongchun, QU Yanyan, et al. Influence of various cooling methods and

- standing time on residual strength of concrete after elevated temperature exposure[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(3):400—405 (in Chinese))
- [32] 王志伟, 霍静思, 郭玉荣. 有约束应力高温全过程后混凝土轴压力学性能试验研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 2:39 (WANG Zhiwei, HUO Jingsi, GUO Yurong. Experimental study on mechanical behaviors of axially-stressed concrete after exposure to high temperatures[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 2:39 (in Chinese))
- [33] Huo J, Jin B, Yu Q, et al. Effect of microstructure variation on damage evolution of concrete at high temperatures [J]. ACI Materials Journal, 2016, 113(5):547—558.
- [34] Goto Y. Cracks formed in concrete around deformed tension bars[J]. ACI Journal, 1971, 68(4):244—251.
- [35] Pothisiri T, Panedpojman P. Modeling of bonding between steel rebar and concrete at elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1):130—140.
- [36] Alonso C, Fernandez L. Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(9):3015—3024.
- [37] 张家铭, 陈俊, 霍静思, 等. 火灾升降温模式对高温后钢筋混凝土轴压力学性能影响的试验研究[J]. 实验力学, 2017, 32(1):70—78 (ZHANG Jiaming, CHEN Jun, HUO Jingsi, et al. Experimental study of the effect of fire mode on axial compression mechanical properties of RC after exposure to entire fire process[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1):70—78 (in Chinese))

Experimental study on bond behavior and damage mechanism analysis of reinforcing steel to concrete interface after elevated temperature

ZHOU Zi-jian¹, HUO Jing-si^{1,2}, JIN Bao^{1,3}

(1. China Ministry of Education Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency, College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China; 3. Wuhuan Engineering Co., Ltd., Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: Bond behavior of reinforcing steel to concrete interface at elevated temperature is the basis of studying fire-resistance of RC structures. Fifteen cubic concrete specimens and eleven central pull-out specimens were made, then compression tests and pullout tests were conducted to experimentally study the variation of concrete compressive strength and bond behavior after exposed to 200~800℃ temperature. Experimental data of bond behavior of reinforcing steel to concrete after exposure to temperatures conducted over the years were statistically analyzed. The experimental temperature field was corrected based on finite element analysis. Degradation and influencing factors of bonding behavior between reinforcing bar and concrete after high temperatures were summarized. At the same time, the correlation between bond strength and compressive strength, elastic modulus and tensile strength of concrete after elevated temperatures was compared and analyzed. Based on existing microstructure tests on plain concrete after elevated temperatures, the change of macroscopic bond behavior was explained from microscopic point of view. Microscopic damage mechanism of bond behavior after elevated temperature heating was analyzed. Analysis results show that the residual bond strength decreases with the increase of heating temperature, which is similar to the degradation of tensile strength of heated concrete. At the same time, the residual bond strength of heated concrete is closely related with its microstructure at elevated temperature, and also related with the porosity of hardened cement paste (HCP).

Keywords: after high temperature; reinforced concrete; bond behavior; statistical analysis; damage mechanisms