

高温下钢筋与混凝土的黏结性能试验与分析^{*}

杨鸥^{1†}, 王朝阳¹, 霍静思^{1,2}

(1. 湖南大学 教育部建筑安全与节能重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要:为研究钢筋混凝土构件在高温下的黏结性能, 制作了25个中心拉拔试件及8个温度场试件, 同时制作了标准立方体试块. 对钢筋、标准立方体试块及中心拉拔试件分别进行室温(20℃)、100℃、200℃、400℃和600℃加温, 完成了高温后钢筋抗拉强度试验、高温下标准立方体试块劈裂抗拉强度试验、温度场试验及中心拉拔试验. 根据温度场试验研究结果, 提出一种简易的高温下中心拉拔试验的方法, 阐述不同温度下钢筋强度、混凝土抗拉劈裂强度及钢筋与混凝土黏结性能的退化规律, 并从混凝土的力学性能退化角度分析了高温环境对黏结强度的影响, 并以割线刚度的方法定量地研究了高温对黏结刚度的影响. 试验结果表明: 高温后钢筋强度在低于400℃时变化不大, 高温下混凝土劈裂抗拉强度基本呈线性下降, 且高温下钢筋与混凝土的黏结强度变化趋势与混凝土抗拉强度衰减趋势相近. 以滑移量0.015 mm为临界点, 黏结刚度与温度的关系曲线呈现两种不同变化形式.

关键词: 高温下; 抗拉强度; 黏结强度; 黏结刚度

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

Experimental Study and Analysis on Bond Performance between Reinforcing Bar and Concrete under High Temperature

YANG Ou^{1†}, WANG Zhaoyang¹, HUO Jingsi^{1,2}

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To investigate the bond performance of reinforcement and concrete components under high temperature, twenty-five central pull-out test specimens and other eight specimens for temperature field test were casted. The corresponding standard cube compressive specimens were also casted for concrete tensile splitting strength test under different temperatures. After exposed to 100℃, 200℃, 400℃, and 600℃, the tensile splitting strength of the cube specimens and the bond properties between rebar and concrete were tested immediately to simulated the concrete circumstance and reinforcing steel performance under high temperature. The strength of rebars which underwent temperature cycle loadings was tested after its cooling. The strength of rebar, tensile splitting strength of the cube specimens, and the bond performance between rebar and concrete under different temperatures were recorded. According to the temperature

^{*} 收稿日期: 2017-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578229), National Natural Science Foundation of China(51578229)

作者简介: 杨鸥(1981-), 男, 湖南宁远人, 湖南大学助理教授, 博士

† 通讯联系人, E-mail: ouyanghnu@hnu.edu.cn

test results, a simplified test method of the bond strength between reinforcing bar and concrete under high temperature was proposed. The effect of high temperature environment on bond performance between rebar and concrete was analyzed from the perspective of the mechanical properties degradation of materials, and the influence of high temperature on bond stiffness was studied by the method of tangential bond stiffness. The experimental results show that the strength of rebar after high temperature shows little change below 400 °C, the tensile splitting strength of concrete decreases linearly with temperatures and the variation trend of bond strength under high temperature is similar to the tensile strength of concrete. The results present two different relationships between bond stiffness and temperature by the slip of 0.015 mm.

Key words: under high temperature; split tensile strength; bond strength; bond stiffness

变形钢筋与混凝土的黏结强度主要取决于两者间的机械咬合力^[1-2],而拉应力是混凝土开裂的关键^[3],当钢筋肋前堆楔作用对混凝土产生的环向拉应力超过混凝土的抗拉强度时,将会使钢筋与混凝土发生黏结破坏^[1-2].高温作用后钢筋与混凝土的力学性能严重退化^[4-6],将会导致钢筋混凝土的黏结性能急剧下降.目前国内外学者就常温下钢筋和混凝土间的黏结性能进行了较为全面的研究^[7-8],同时对高温后的黏结性能也进行了较深入的分析,研究结果表明随着温度的增高,钢筋与混凝土的黏结强度呈现降低趋势,峰值滑移逐渐增大^[3,9-10].另一些学者研究发现在较低温度段时黏结强度下降缓慢甚至略有增大的现象^[11].

目前,大部分学者^[12-13]在试验装置上设置高温炉以保证试验时试件处于高温环境,因此高温拉拔装置较为复杂,国内外对高温下钢筋与混凝土的黏结性能研究相对较少.同时虽然一些学者基于自己的试验给出了恒温时间的建议^[14-15],但由于试件规格、含水率、配合比等因素不同,将设定温度假定为黏结段温度进行分析并不合理.本次试验监测拉拔试件核心黏结段温度随时间的变化情况,提出一种简易的高温下拉拔试验方法,同时对已有的高温下及高温后钢筋与混凝土两种材料强度的退化数据进行统计并与试验得到的强度退化结果进行对比,以高温下混凝土力学性能退化原理来阐述高温下黏结性能退化机理.

1 试验概况

1.1 试件设计

试件混凝土设计强度为 C45,其配合原料为:强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥,石灰质粗骨料(骨料粒径≤15 mm),细骨料为天然河砂,拌合水为

自来水.混凝土设计配合比(质量比)为水泥:水:砂:石子=1:0.4:1.08:2.09;混凝土 28 d 实测平均抗压强度为 47.5 MPa;试验前实测平均抗压强度为 54.0 MPa;采用沪南电炉烘箱厂制造的 101-3A 型电热鼓风恒温干燥箱烘烤标准立方体试块,实测混凝土含水率为 0.47%.试件拉拔钢筋为直径 20 mm 的 HRB500 钢筋,实测屈服强度为 558 MPa,极限强度为 683 MPa,箍筋采用直径 6 mm 的 HRB400 钢筋.拉拔试件尺寸如图 1(a)所示.温度场试件与拉拔试件外部尺寸相同,如图 1(b)所示,热电偶温度测点位于黏结段中心但不与钢筋接触.

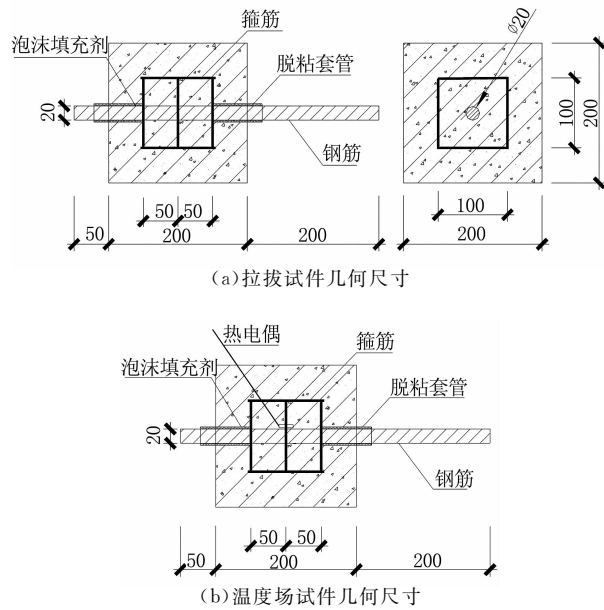


图 1 试件几何尺寸(单位:mm)
Fig. 1 Dimensions of specimens(Unit:mm)

1.2 试验装置及试验方法

升温装置采用多功能组合式结构试验高温炉,温度控制和温度测试采用工控机和控制软件进行控制、显示和保存.

本次拉拔试验采用无锡新路达制造的 WA-

1000B 型电液式万能试验机,并设计了一种可消除高温对位移计及力传感器影响的拉拔试验装置,如图 2 所示.使用力传感器和电阻式位移计分别对试验中的拉拔力及自由端位移进行测量,使用 National Instruments 的数据采集卡进行采集.

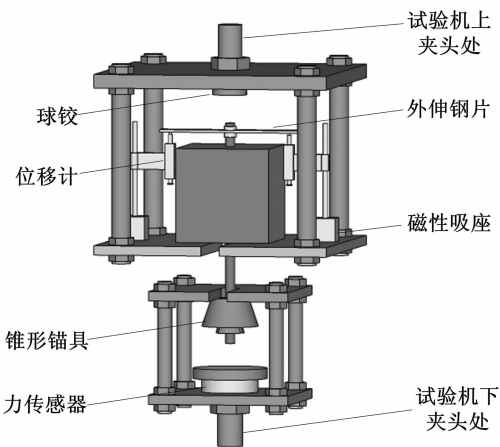


图 2 拉拔试验装置
Fig. 2 The pull-out test setup

高温试验分为温度场试验、钢筋与混凝土两种材料高温力学性能试验及高温下中心拉拔试验 3 个部分.升温制度统一设定为升温速率 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ^[15],恒温时间由温度场试验升温段结果决定(实测恒温

5 h 时黏结段温度基本已达到设定温度,故恒温时间设定为 5 h).恒温时间结束后立即取出温度场试件放于室内环境中自然冷却 50 min,观察完成一次拉拔试验过程中黏结段温度变化情况(保守估计完成一次高温拉拔试验为 50 min,实际完成一次高温拉拔试验约为 30 min),整个升降温过程中采用 M400 温度巡检仪记录试件核心黏结区温度变化.同样,恒温结束后分别完成高温后钢筋抗拉试验、高温下标准立方体劈裂抗拉试验及钢筋与混凝土拉拔试验.

2 试验结果

2.1 温度场试验

升温过程中炉膛温度与试件黏结区温度变化曲线如图 3(a)所示,恒温 5 h 时试件黏结段的温度基本已达到目标温度.由图 3(b)可知,室内环境下(实测试验时室内环境为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$)试件核心区温度在 20 min 内基本保持稳定,超过 20 min 后缓慢下降,在室内环境下冷却 30 min 时核心黏结区温度降幅约为 11%左右,黏结区温度下降不多,因此对于从炉内取出高温拉拔试件在室内环境下 30 min 内完成的拉拔试验,可以认为是设定温度下的高温试验.

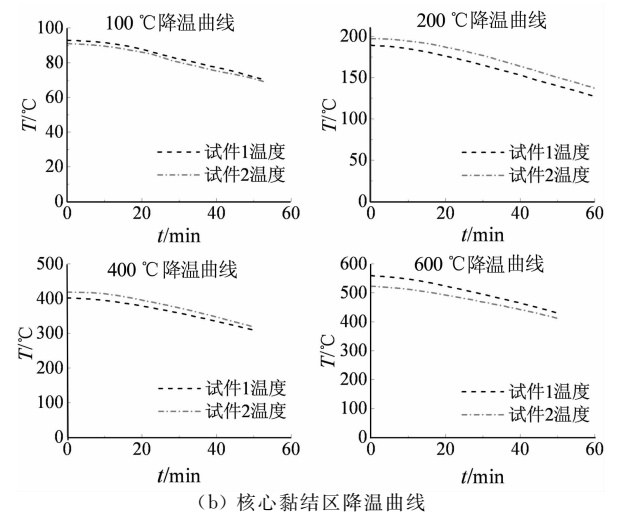
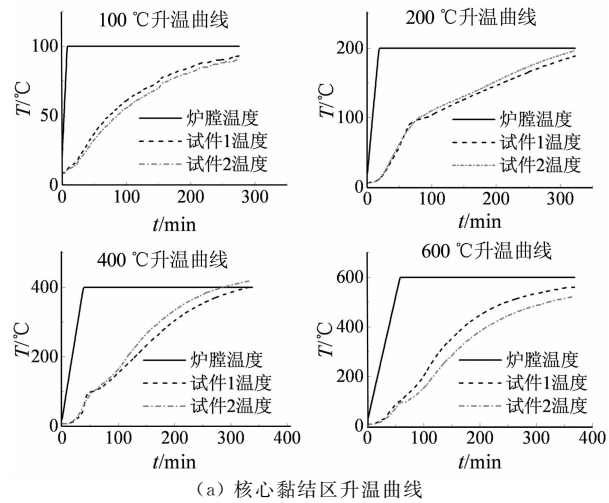


图 3 核心区升温及降温曲线
Fig. 3 The heating and cooling curves for core bond region

2.2 钢筋与混凝土高温力学性能试验

高温后钢筋抗拉试验在万能试验机上完成,高温下混凝土劈裂试验在压力试验机上完成.钢筋与混凝土材料高温力学性能试验结果如表 1 所示.

2.3 高温下钢筋与混凝土黏结性能试验

常温拉拔试件的破坏呈现较为明显的劈裂破坏特征.在荷载较大时会在临近加载端的侧面形成细微纵向裂纹并迅速向自由端发展,随着拉拔力进一

步增大试件侧面纵向裂纹迅速变宽并贯穿整个保护层,此时荷载达到峰值后瞬间下降且自由端伴有明显的滑移. 由于箍筋的对混凝土的横向约束作用,试件在达到极限荷载时仍保留少许的黏结力. 经历了高温的拉拔试件在加载的过程中虽然也产生纵向劈裂裂纹,但其黏结力在达到峰值荷载后缓慢下降同时自由端滑移缓慢增大,高温下试件破坏特征逐渐向拔出破坏过渡. 拔出试件的破坏形态及特征值见表 2.

表 1 钢筋与混凝土材料高温力学性能试验结果

Tab. 1 Mechanical indexes of bar & concrete at high temperatures

T/℃	钢筋				混凝土	
	f_y /MPa	折减系数	f_u /MPa	折减系数	f_t /MPa	折减系数
20	558	1.00	683	1.00	2.93	1.00
100	523	0.94	667	0.98	2.33	0.80
200	557	1.00	683	1.00	2.42	0.83
400	556	1.00	688	1.01	1.83	0.62
600	476	0.85	602	0.88	1.08	0.37

注:钢筋与混凝土强度均为平均值. 其中 f_y 为钢筋屈服强度, f_u 为钢筋抗拉强度, f_t 为混凝土劈裂抗拉强度.

表 2 高温下试件拔出试验结果

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

试件编号	温度/℃	破坏形式	黏结强度/MPa	黏结强度 均值/MPa	峰值滑移/mm	峰值滑移 均值/mm
NT20-1	20	带裂纹拔出	21.01	22.18	0.54	0.60
NT20-2			24.90		0.72	
NT20-3			22.98		1.25 ¹⁾	
NT20-4			21.03		0.55	
NT20-5			22.53		—	
HT100-1	100	带裂纹拔出	16.14	14.66	0.64	—
HT100-2			14.87		0.95	
HT100-3			15.99		0.92	
HT100-4			12.66		0.45	
HT100-5			13.61		0.54	
HT200-1	200	带裂纹拔出	16.00	15.27	0.81	0.78
HT200-2			15.33		0.67 ¹⁾	
HT200-3			17.19		0.82	
HT200-4			13.67		1.13 ¹⁾	
HT200-5			14.17		0.7	
HT400-1	400	带裂纹拔出	14.18	13.06	0.86 ¹⁾	1.09
HT400-2			9.34 ¹⁾		1.42 ¹⁾	
HT400-3			12.95		1.14	
HT400-4			14.86 ¹⁾		1.08	
HT400-5			12.06		1.05	
HT600-1	600	带裂纹拔出	10.97 ¹⁾	9.13	1.43	1.44
HT600-2			9.34		1.43	
HT600-3			9.14		1.31	
HT600-4			9.83		1.43	
HT600-5			8.20		1.62	

注:“NT”表示常温,“HT”表示高温;第一组数字表示温度,第二组数字表示试件编号;“1)”表示超出平均值 15%予以舍去.

3 分析与讨论

3.1 高温作用下钢筋与混凝土力学性能

高温下钢筋与混凝土的黏结性能与这两种材料在高温下的力学性能的变化有密切关系. 文献[4]统计整理了国内外学者关于钢筋与混凝土两种材料的强度随温度变化的折减系数,因此本文对文献[4]中所整理的一部分高温下和高温后材料强度折减数据以及其他学者研究成果进行了统计,并与试验实测强度折减系数进行对比. 高温下和高温后钢筋强度

变化规律如图 4 所示. 高温下钢筋屈服强度以 200℃为界,低于 200℃时下降缓慢而高于 200℃时迅速下降;高温下钢筋的极限强度在 400℃前下降缓慢甚至略有提高,当温度高于 400℃后极限强度迅速下降,600℃时强度不到常温下的 40%,与文献[16]的结论基本一致. 而高温后钢筋强度在温度大于 400℃后才呈现较小的下降趋势,600℃时强度下降约 10%. 对比屈服强度与极限强度衰减趋势可知,高温下和高温后钢筋屈服强度劣化程度大于其极限强度. 对比高温下和高温后钢筋强度折减系数可知,高温下钢筋的强度劣化程度要远大于其高温

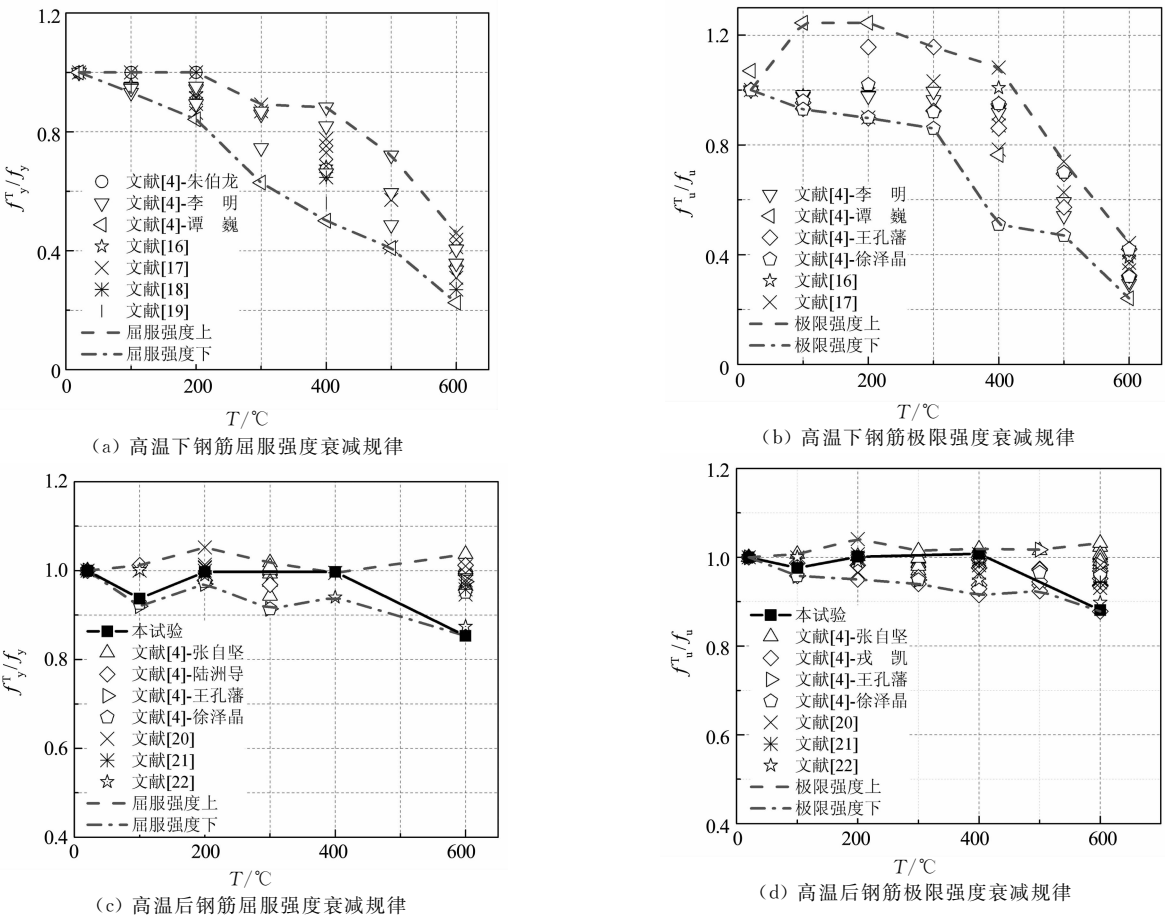


图 4 高温下及高温后钢筋强度退化规律

Fig. 4 Relative strength of steel rebar under and after high temperature from test and previous data

后强度的退化。

图 5、图 6 分别给出了高温下混凝土抗压强度衰减曲线、高温下及高温后混凝土劈裂抗拉强度衰减曲线,由于各个学者所使用的混凝土配合比、骨料种类、恒温时间等不同,因此试验数据之间略有差异,但经历高温作用的混凝土强度变化整体趋势为随着温度升高而下降.对于高温下混凝土抗压强度,如图 5 所示,当温度小于 300 °C 时衰减缓慢,大于 300 °C 时混凝土抗压强度迅速衰减, Huo 等^[23]、胡海涛等^[24]得到类似结论.由图 6 可知,抗拉强度随温度升高整体呈线性下降,在温度小于 200 °C 之前下降缓慢,高于 200 °C 时抗拉强度随温度升高迅速下降.由图 5 与图 6 对比可知,高温作用的混凝土劈裂强度劣化程度比抗压强度要大得多.本试验得到的混凝土劈裂强度衰减系数处于图 6 的下限但与文献^[14]数据吻合良好,查阅统计文献发现本次试验恒

温时间较长因此混凝土抗拉强度偏低,而文献^[14]的恒温时间为 6 h 与本试验恒温时间 5 h 相差不多所以吻合较好.

高温下混凝土强度的变化与混凝土内部发生复杂的物理化学发应息息相关:在 100~300 °C 时由于混凝土内部自由水和结合水相互被蒸发,在此阶段混凝土的抗压强度下降缓慢甚至略有提高^[23,25].在 400~600 °C 时混凝土中的 C—S—H 凝胶在高温作用下已经严重破坏,因此混凝土强度迅速下降^[23-24,26].高温作用的混凝土劈拉强度比抗压强度劣化更加严重,主要是由于混凝土劈拉强度主要取决于粗骨料与水泥砂浆的黏结强度,在混凝土劈裂抗拉试验中混凝土中的温度裂隙在拉应力作用下加剧了混凝土抗拉强度的降低,因此混凝土抗拉强度对温度损伤更为敏感,高温下混凝土劈拉强度衰减比抗压强度要大得多.

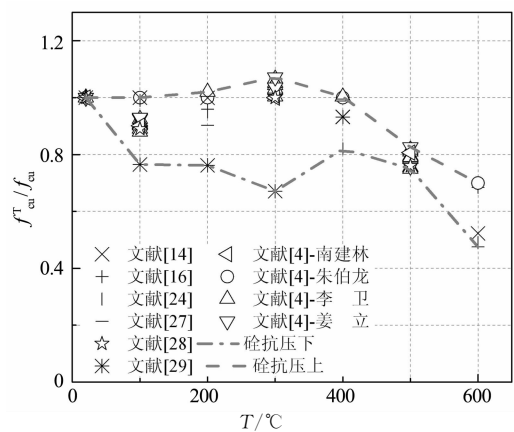


图 5 高温下砼抗压强度衰减规律

Fig. 5 Relative compressive strength of concrete under high temperature from previous data

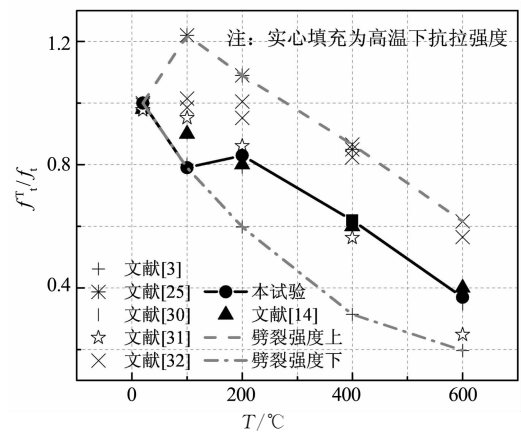


图 6 高温下及高温后砼劈拉强度衰减规律

Fig. 6 Relative tensile splitting strength of concrete under and after high temperature from test and previous data

3.2 高温作用下钢筋与混凝土黏结强度

图 7 给出了不同温度下钢筋与混凝土的黏结-滑移曲线,对比不同温度下的黏结-滑移曲线,可以发现随着温度升高黏结强度下降,峰值滑移增大.由于高温下黏结试验有限,因此表 3 统计了已有学者完成的高温下及高温后钢筋与混凝土黏结试验结果,将各个学者试验中的高温黏结强度退化系数绘于图 8 中.大部分试验^[9-10,13,32]均表明在 100~300 °C 时高温后黏结强度下降较少,大于 400 °C 时黏结强度退化显著. Bingöl 等^[11]研究表明在低于 150 °C 时,高温后残余黏结强度略有提高.一般而言,高温

下黏结强度较高温后略有提高.而本试验黏结强度在 100 °C 有一个较大的降低主要是由于混凝土内部自由水被蒸发内部裂隙增多导致混凝土强度降低,且较长的恒温时间导致温度对黏结段的损伤比其他学者的更为严重;在 200 °C 时黏结强度略有回升的原因是由于混凝土内部结合水脱出加强混凝土内部二次水化作用,从而使混凝土强度略有增强;400~600 °C 时黏结强度随着温度升高而下降,主要是由此温度段内混凝土中的 C—S—H 凝胶在高温作用下已经严重破坏,HCP 与粗骨料黏结界面裂纹进一步发展,混凝土强度迅速下降^[23]所导致.

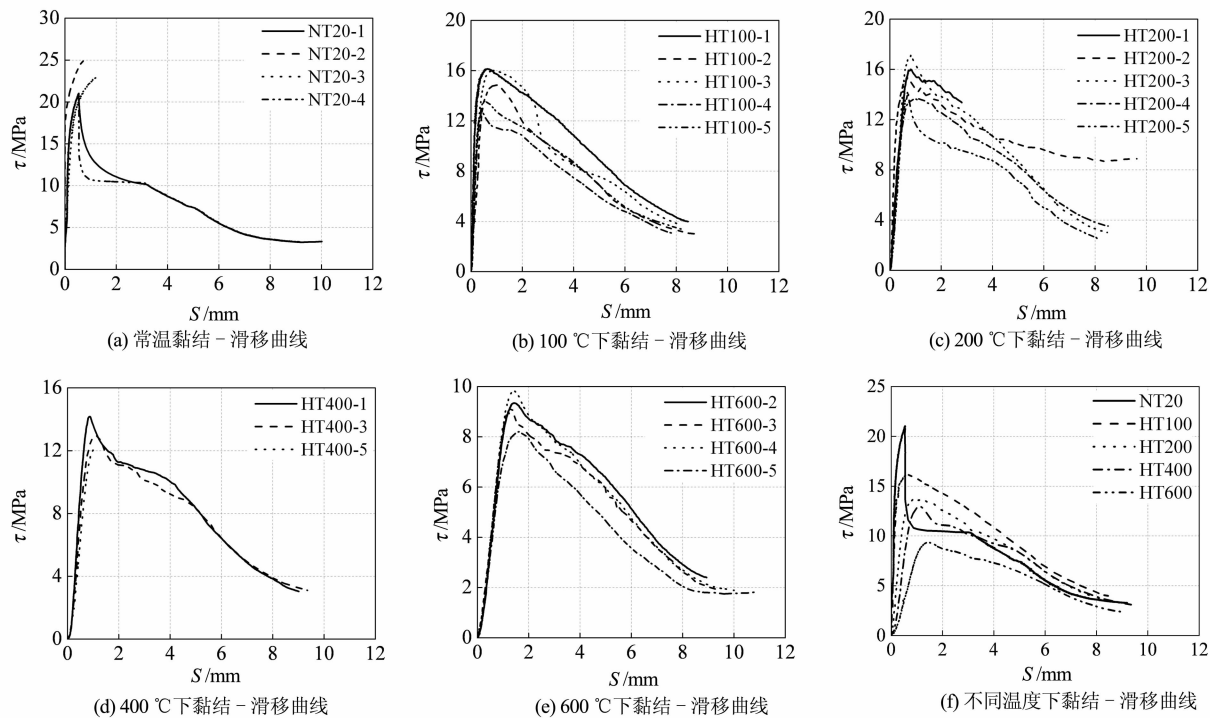


图 7 高温下钢筋混凝土黏结-滑移曲线

Fig. 7 Bond-slip curves of specimens under high temperatures

为了进一步分析高温下混凝土抗拉强度和钢筋与混凝土间的黏结强度之间的关系,将混凝土抗拉强度折减系数、钢筋与混凝土黏结强度折减系数及二者相对强度绘于图 9 中.由图 9 可以知,高温下钢筋与混凝土黏结强度折减系数变化趋势基本与混凝土抗拉强度折减系数变化一致:均在 100 ℃ 时有一个较大的下降,在 200 ℃ 时略有回升,之后随温度升高呈线性下降.通过两者的相对强度比值可以发现,相对强度值在 100~200 ℃ 时达到最低,在 200~600 ℃ 时相对强度逐渐增大即黏结强度下降趋势略缓于抗拉强度.相对强度在 100 ℃ 时有一个陡降的过程主要是由于此温度段内自由水蒸发而形成的内

部裂隙导致混凝土强度降低,在 100~200 ℃ 时有略微的回升,一方面由于混凝土结合水脱出加强了残余的水泥颗粒二次水化作用,有利于混凝土抗拉强度的提高;另一方面为箍筋的有利作用逐渐显著,箍筋有效地约束了高温下混凝土的横向变形,从而增大了两者之间的相互作用力加强了摩阻力和机械咬合力.相对强度在 200~600 ℃ 时逐渐增大,可能是由于在高温作用下混凝土强度逐渐衰减的过程中箍筋对混凝土有利的约束作用随温度升高逐渐显著,部分抵消了混凝土强度降低带来的不利作用从而有效减小了黏结强度退化,导致相对强度略有增大.

表 3 高温作用钢筋与混凝土黏结试验统计
Tab.3 Experimental datas of concrete-bar bond at high temperature

试验者	试件尺寸 (mm×mm×mm)	砼抗压强度 /MPa	钢筋 种类	钢筋直径 /mm	黏结长度 /mm	横向 约束	高温 种类	升温制度 (℃/min,min)	冷却 方式
本试验	200×200×200	54.0	变形钢筋	20	100	有	高温下	10,300	无
袁广林 ^[13]	150×150×160	35.0	变形钢筋	16	100	有	高温下/后	10,45	无/—
朱伯龙 ^[33]	—	30.0	光圆,螺纹	16,20	80,40	无	高温下/后	—,30	无/—
谢狄敏 ^[3]	100×100×100	—	变形钢筋	10	50	无	高温后	—,10	F
Arel ^[6]	150×150×150	65.5	变形筋	14	70	无	高温后	—,180	F
袁广林 ^[9]	150×150×420	35.0	变形钢筋	16	100	有	高温后	10,45	A/W
肖建庄 ^[10]	160×160×160	106.4	变形筋	16	80	无	高温后	15,120~180	F
Bingöl ^[11]	φ100×200	20,35	变形筋	8	60,100,160	无	高温后	12~20,180	A/W
周新刚 ^[34]	100×100×100	33.75	光圆,变形	12,14,16,22	4d	无	高温后	—,120	F

注:冷却方式中“F”代表炉内自然冷却,“A”代表空气冷却,“W”为喷水冷却(图 8 同);升温制度包括升温速率和恒温时间.

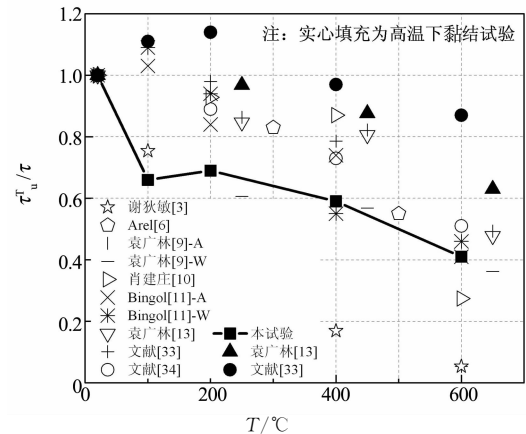


图 8 高温作用钢筋与混凝土黏结强度退化规律
Fig.8 Comparisons of relative bond strength from test and previous data

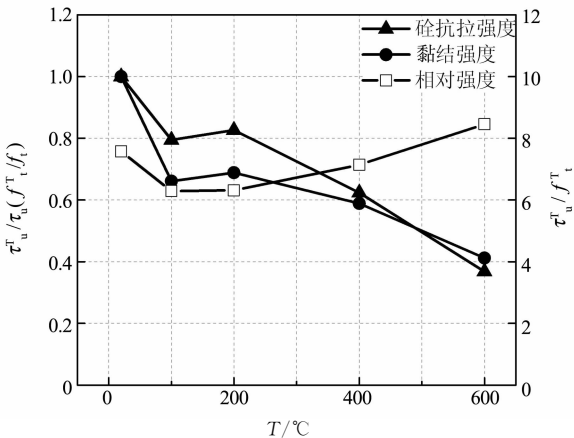


图 9 高温下钢筋与混凝土黏结强度及相对强度变化规律
Fig.9 Comparisons of relative strengths under high temperatures

3.3 高温作用下钢筋与混凝土的黏结刚度

为研究温度对钢筋与混凝土的黏结刚度的影响,定义割线黏结刚度 $k(s)$ 为滑移值对应的黏结应力与相应滑移值的比值,同时定义割线黏结刚度折减系数 $\xi(s)$ 为同一滑移值的不同温度下的割线刚度

与常温割线刚度的比值,分别如式(1)、式(2)所示.

$$k(s) = \frac{\tau(s)}{s} \tag{1}$$

$$\xi(s) = \frac{k_T(s)}{k_0(s)} \tag{2}$$

式中: $k(s)$ 为割线黏结刚度(MPa/mm); s 为滑移值(mm); $\tau(s)$ 为相应于滑移值 s 的黏结应力(MPa); $\xi(s)$ 为相应于滑移值 s 的割线黏结刚度折减系数; $k_T(s)$ 为相应于滑移值 s 的不同温度下的割线黏结刚度(MPa/mm); $k_0(s)$ 为相应于滑移值 s 的常温条件下的割线黏结刚度(MPa/mm).

将不同温度下试件的不同滑移量对应的黏结刚度进行对比,如图 10 所示.由图 10 可知同一温度对应的黏结刚度随着滑移量的增大逐渐减小,而同一滑移量对应的黏结刚度随着温度的升高则表现出两种不同的变化趋势,即当滑移量 $s<0.015\text{ mm}$ 时,黏结刚度 k 随着温度的升高而减小;当滑移量 $s\geq 0.015\text{ mm}$ 时,黏结刚度 k 随着温度的升高呈现先增大后减小的趋势.同时观察图 11 可以发现滑移量 $s=0.015\text{ mm}$ 对应的黏结刚度基本为上包络线,而滑移量 $s=0.005\text{ mm}$ 对应的黏结刚度为下包络线.究其原因主要是由于在滑移量较小时($s<0.015\text{ mm}$)钢筋与混凝土的黏结应力主要由化学胶结力提供,当滑移量较大时($s\geq 0.015\text{ mm}$)化学胶结力破坏,此时钢筋与混凝土的黏结应力主要由机械咬合力与摩阻力提供.由于化学胶结力在高温过程中遭到破坏,因此较小滑移量($s<0.015\text{ mm}$)对应的黏结刚度对温度更为敏感,因此随温度升高反而下降,而在温度小于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时钢筋体积膨胀则会增大钢筋与混凝土的相互作用力从而提高机械咬合力;当温度大于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时虽然钢筋体积受热膨胀但此时混凝土逐渐劣化,钢筋体积膨胀使混凝土产生环形拉应力,加剧了混凝土内部裂纹开裂,导致黏结刚度逐渐退化,因此黏结刚度随温度升高而下降.

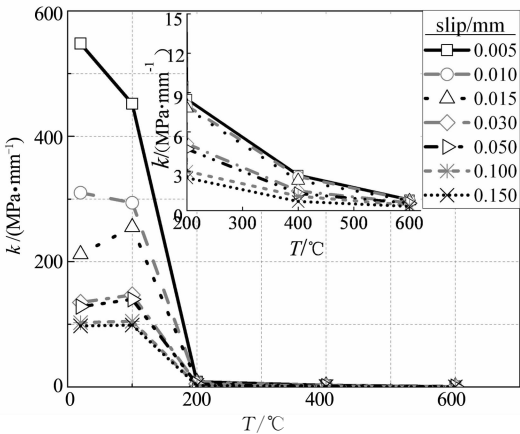


图 10 不同滑移时割线黏结刚度对比
Fig. 10 Secant bond stiffness at different slip

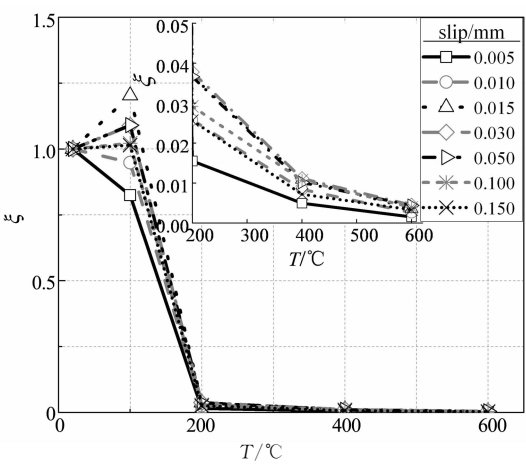


图 11 不同滑移时割线黏结刚度折减系数对比
Fig. 11 Relative secant bond stiffness at different slip

4 结 论

本文通过将钢筋混凝土试件加温后快速进行试验,研究了钢筋混凝土构件在高温下的材料性能及黏结性能变化规律,得出如下结论:

1)高温后钢筋屈服强度、极限强度在 $100\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内变化不大甚至极限强度略有提高,当超过 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后强度有所降低,在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时屈服强度下降了 15% 、极限强度下降了 12% .高温后的钢筋屈服强度退化比极限强度更加严重.

2)高温下混凝土劈裂抗拉强度随温度升高整体呈线性下降趋势.混凝土劈拉强度在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时有较大降幅约为 20% , $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时稍有回升但回升幅度不超过 5% ,大于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时抗拉强度急剧退化且随温度升高呈线性下降,在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 抗拉强度仅为常温下的 37% .

3)高温下黏结强度变化趋势与混凝土抗拉强度衰减趋势基本一致,但高于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时黏结强度退化趋势明显缓于混凝土抗拉强度,其主要原因为为在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时箍筋的有利作用逐渐显著,且随着温度升高箍筋对黏结强度的有利作用逐渐增大.

4)以割线黏结刚度的方法定量地研究了黏结刚度随温度的变化规律.当滑移量 $s<0.015\text{ mm}$ 时,黏结刚度 k 随着温度的升高而减小;当滑移量 $s\geq 0.015\text{ mm}$ 时,黏结刚度 k 随着温度的升高呈现先增大后减小的趋势.

参考文献

[1] KHALAF J, HUANG Z, FAN M. Analysis of bond-slip between concrete and steel bar in fire[J]. Computers & Struc-

- tures, 2016, 162(C): 1—15.
- [2] WANG X, LIU X. A strain-softening model for steel-concrete bond[J]. Cement & Concrete Research, 2003, 33(10): 1669—1673.
 - [3] 谢狄敏, 钱在兹. 高温作用后混凝土抗拉强度与黏结强度的试验研究[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1998, 32(5): 597—602.
XIE D M, QIAN Z C. Research on bond and tension of concrete after high temperature[J]. Journal of Zhejiang University (Natural Science), 1998, 32(5): 597—602. (In Chinese)
 - [4] 梁悦欢. 钢筋和混凝土高温力学性能的统计分析及应用[D]. 广州: 华南理工大学土木与交通学院, 2008: 20—62.
LIANG Y H. The statistical analysis and application of mechanical properties for steel bar and concrete at elevated temperature[D]. Guangzhou: School of Engineering and Transportation, South China University of Technology, 2008: 20—62. (In Chinese)
 - [5] 翟越, 艾晓芹, 邓子辰, 等. 受火温度和冷却方式对混凝土抗压强度影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(11): 74—80.
ZHAI Y, AI X Q, DENG Z C, *et al.* Influences of cooling mode and high temperature on concrete compressive strength[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2014, 41(11): 74—80. (In Chinese)
 - [6] AREL H S. Effect of different parameters on concrete-bar bond under high temperature[J]. Aci Materials Journal, 2014, 111(6): 633—639.
 - [7] HARA J I M H. Comparison of bond strength of steel bars in normal and high-strength concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(4): 365—374.
 - [8] 徐有邻. 变形钢筋-混凝土黏结锚固性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学土木水利学院, 1990: 43—49.
XU Y L. Experimental study of anchorage properties for deformed bar in concrete[D]. Beijing: Faculty of Civil Engineering Hydraulics, Tsinghua University, 1990: 43—49. (In Chinese)
 - [9] 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]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 290—294.
YUAN G L, GUO C, LÜ Z T. Experimental study on bond performance between bar and concrete after high temperature[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2006, 34(3): 290—294. (In Chinese)
 - [10] 肖建庄, 黄均亮, 赵勇. 高温后高性能混凝土和细晶粒钢筋间黏结性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(10): 1296—1301.
XIAO J Z, HUANG J L, ZHAO Y. Experimental study on bond behavior between HPC and fine grain steel bar after elevated temperatures[J]. Journal of Tongji University(Natural Sciences), 2009, 37(10): 1296—1301. (In Chinese)
 - [11] 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.
 - [12] DIEDERICH S U, SCHNEIDER U. Bond strength at high temperatures[J]. Magazine of Concrete Research, 1981, 33(115): 75—84.
 - [13] 袁广林, 郭操, 吕志涛. 高温下钢筋混凝土黏结性能的试验与分析[J]. 工业建筑, 2006, 36(2): 57—60.
YUAN G L, GUO C, LÜ Z T. Experimental study on bond property of reinforced concrete at high temperatures[J]. Industrial Construction, 2006, 36(2): 57—60. (In Chinese)
 - [14] 李卫, 过镇海. 高温下砼的强度和变形性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 1993, 14(1): 8—16.
LI W, GUO Z H. Experimental investigation of strength and deformation of concrete at elevated temperature[J]. Journal of Building Structures, 1993, 14(1): 8—16. (In Chinese)
 - [15] 霍静思, 何远明, 肖莉平, 等. 高温后钢管混凝土抗多次冲击力学性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(9): 6—10.
HUO J S, HE Y M, XIAO L P, *et al.* Experimental study on the dynamic behavior of concrete-filled steel tube after exposure to high temperatures under multiple impact loadings[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2012, 39(9): 6—10. (In Chinese)
 - [16] 钮宏, 陆洲导, 陈磊. 高温下钢筋与混凝土本构关系的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1990, 18(3): 287—297.
NIU H, LU Z D, CHEN L. An experimental study on constitutive relationship between reinforced bar and concrete under elevated temperature[J]. Journal of Tongji University(Natural Sciences), 1990, 18(3): 287—297. (In Chinese)
 - [17] 吕彤光, 时旭东, 过镇海. 高温下 I ~ V 级钢筋的强度和变形试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 1996, 24(S1): 13—19.
LÜ T G, SHI X D, GUO Z H. Experimental study on the strength and deformation behavior of I ~ V steel bar under high temperature[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science), 1996, 24(S1): 13—19. (In Chinese)
 - [18] 赵金城. 高温下钢材力学性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2000, 30(4): 26—28.
ZHAO J C. Experimental study on strength property of steel under high temperature[J]. Building Structure, 2000, 30(4): 26—28. (In Chinese)
 - [19] POH K W. Stress-strain-temperature relationship for structural steel[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001, 13(5): 371—379.
 - [20] 余志武, 王中强, 史召锋. 高温后新Ⅲ级钢筋力学性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 112—116.
YU Z W, WANG Z Q, SHI Z F. Experimental research on material properties of new Ⅲ grade steel bars after fire[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 112—116. (In Chinese)
 - [21] 丁发兴, 余志武, 温海林. 高温后 Q235 钢材力学性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(2): 245—249.
DING F X, YU Z W, WEN H L. Experimental research on mechanical properties of Q235 steel after high temperature treat-

ment[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(2): 245—249. (In Chinese)

[22] 吴红翠, 王全凤, 徐玉野, 等. HRBF 500 钢筋高温后力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(11): 5—8.
WU H C, WANG Q F, XU Y Y, *et al.* Experimental research on mechanical properties of HRBF 500 after high temperatures [J]. Industrial Construction, 2009, 39(11): 5—8. (In Chinese)

[23] HUO J, JIN B, YU Q, *et al.* Effect of microstructure variation on damage evolution of concrete at high temperatures[J]. Aci Structural Journal, 2016, 113(5): 547—558.

[24] 胡海涛, 董毓利. 高温时高强混凝土强度和变形的试验研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(6): 44—47.
HU H T, DONG Y L. Experimental research on on the strength and deformation behavior of high strength concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(6): 44—47. (In Chinese)

[25] AHMAD S, SALLAM Y S, AL-HAWAS M A. Effects of key factors on compressive and tensile strengths of concrete exposed to elevated temperatures[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(6): 4507—4513.

[26] 傅博, 杨长辉, 叶剑雄, 等. 高温对碱矿渣水泥石微结构及力学性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(8): 90—96.
FU B, YANG C H, YE J X, *et al.* Microstructure and mechanical properties of alkali-activated slag cement pastes[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2013, 40(8): 90—96. (In Chinese)

[27] 姚亚雄, 朱伯龙. 钢筋混凝土框架结构抗火试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1996, 24(6): 619—624.
YAO Y X, ZHU B L. Experimental study on the fire of reinforced concrete frame structure[J]. Journal of Tongji University(Natural Sciences), 1996, 24(6): 619—624. (In Chinese)

[28] 刘利先, 吕龙, 刘铮, 等. 高温下及高温后混凝土的力学性能研究[J]. 建筑科学, 2005, 21(3): 16—20.
LIU L X, LÜ L, LIU Z, *et al.* Investigation on the mechanical behavior of concrete at and after elevated temperature[J]. Building Science, 2005, 21(3): 16—20. (In Chinese)

[29] 霍静思, 王鹏, 禹琦. 水灰比对高温下混凝土力学性能影响试验研究[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(4): 199—206.
HUO J S, WANG P, YU Q. Effect of water-cement ratio on mechanical behavior of concrete at elevated temperatures[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(4): 199—206. (In Chinese)

[30] 覃丽坤, 宋玉普, 王玉杰, 等. 高温对混凝土力学性能影响的试验研究[J]. 混凝土, 2004(5): 9—11.
QIN L K, SONG Y P, WANG Y J, *et al.* Testing research of mechanics characteristics of concrete affected by high temperature[J]. Concrete, 2004(5): 9—11. (In Chinese)

[31] 胡翠平, 徐玉野, 罗漪, 等. 高温作用后混凝土抗拉强度的影响分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(2): 196—201.
HU C P, XU Y Y, LUO Y, *et al.* Experimental study on tensile strength of concrete after high temperature [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Sciences), 2014, 35(2): 196—201. (In Chinese)

[32] 袁广林, 郭操, 李庆涛, 等. 高温后冷却环境对钢筋混凝土黏结性能的损伤[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 605—608.
YUAN G L, GUO C, LI Q T, *et al.* Bond damage reinforced concrete caused by cooling after high temperature[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(5): 605—608. (In Chinese)

[33] 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, 16(1): 37—43.
ZHU B L, LU Z D. An experimental study on constitutive relationship between concrete and reinforced bar under elevated temperature[J]. Sichuan Building Science, 1990, 16(1): 37—43. (In Chinese)

[34] 周新刚, 吴江龙. 高温后混凝土与钢筋黏结性能的试验研究[J]. 工业建筑, 1995, 25(5): 37—40.
ZHOU X G, WU J L. 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)