

文章编号: 1000-4750(2013)06-0205-07

基于微观结构分析的再碱化对高温后混凝土抗压强度修复试验研究

熊焱^{1,2}, 吴迪^{1,3}, 刘赋安²

(1. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640; 2. 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510640;

3. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405)

摘要: 该文对高温作用经再碱化修复后的混凝土进行了压汞测孔试验及抗压强度试验, 研究了混凝土微观结构与其宏观力学性能之间的关系。试验结果表明, 高温后混凝土的抗压强度随着温度升高呈现下降的趋势, 混凝土的微观结构变差, 粗大孔明显增多; 经再碱化修复后, 混凝土的抗压强度得到一定程度的提高, 微观结构得到明显改善, 粗大孔明显减少。混凝土微观结构的变化与其宏观力学性能一致, 说明了再碱化可以一定程度的修复高温作用后混凝土的力学性能, 同时改善混凝土的耐久性能。

关键词: 混凝土; 高温; 试验; 再碱化; 微观结构; 抗压强度

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.02.0098

EXPERIMENTAL STUDY ON REALKALIZATION REPAIR OF CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH AFTER HIGH-TEMPERATURE BASED ON MICROSTRUCTURE ANALYSIS

XIONG Yan^{1,2}, WU Di^{1,3}, LIU Fu-an²

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. Earthquake Engineering Research & Test Center of Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: The experiments of mercury intrusion porosimetry and compressive strength of concrete after high temperature are performed, and the relationship between microstructure and mechanical properties of concrete is investigated. The results show that the compressive strength of concrete decreased with the temperature increased, the microstructure of concrete becomes worse, and the macro porous has evident increase. After realkalization, the compressive strength of concrete is improved to some extent, the microstructure is improved obviously, and the macro porous is decreased significantly. The variation of microstructure in concrete is in consistence with the change of mechanical properties, which draws a conclusion that the realkalization repairing can recover the mechanical property and the durability of concrete after high temperature.

Key words: concrete; high temperature; test; realkalization; microstructure; compressive strength

近年来, 许多学者对高温后混凝土材料的性能损伤机理及其宏观力学性能变化规律作了大量的

试验研究, 并对火灾后混凝土结构的损伤进行了科学评估, 据此制定了合理的修复策略。李宁波等通

收稿日期: 2012-02-18; 修改日期: 2012-05-31

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(50908088); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB013800); 广州市珠江科技新星专项项目(2012J2200027); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究课题项目(2012ZC26)

通讯作者: 熊焱(1978), 女, 江西人, 讲师, 博士, 主要从事混凝土结构抗火、耐久性研究(E-mail: xyan@scut.edu.cn).

作者简介: 吴迪(1978), 男, 江西人, 讲师, 博士, 主要从事结构抗灾减灾研究(E-mail: wudiwzoo@gmail.com);

刘赋安(1986), 男, 江西人, 硕士生, 主要从事混凝土结构抗火、耐久性研究(E-mail: liufuan2011@hotmail.com).

过四种水灰比的混凝土高温后的强度试验，得出了混凝土的残余强度衰减规律，并分析了高温衰退机理^[1]。吴波等利用扫描电子显微镜对不同温度作用后的C70和C85两种高强混凝土的微观结构进行了观察分析，总结了高强混凝土内部结构随温度的变化规律，分析了高温后高强混凝土宏观力学性能的变化原因^[2]。吕天启等通过X射线衍射分析及扫描电镜观测，研究了经过高温、冷却并静置若干时间后混凝土的物相及微观形貌，从化学成分的变化上分析了混凝土强度降低的原因^[3]。冯竟竟等研究表明，随着温度升高，水泥基材料内部致密的水泥浆体结构逐渐被破坏，300℃后尤为严重并由表及里逐步深化，孔隙率明显增加、阈值孔径不断增大、“孔粗大化”严重^[4]。柳献等认为升温至400℃之前，混凝土材料的质量损失主要来自于内部水分的散失，400℃后氢氧化钙开始分解，石灰石不参与自密实混凝土的水化反应^[5]。本文通过对300℃和600℃高温作用后的混凝土试块进行电化学再碱化修复的初步试验研究，从微观结构层面分析再碱化对高温作用后混凝土抗压强度修复的角度出发，探究了再碱化的修复机理及其效果。

1 试验设计与试验方法

1.1 试件设计

1.1.1 试件的制备

本试验原料采用石井牌425级普通硅酸盐水泥，河砂(经清洗除泥，105℃下烘干至恒重)，粒径小于15mm的碎石。采配合比为水泥：水：砂：石=1：0.52：1.94：2.47，配制出强度等级为C40的普通混凝土。本试验共制作24个8组尺寸为100mm×100mm×100mm立方体混凝土试块，所有试块一次浇筑完成，拆模后在标准养护箱中养护28d。

1.1.2 试件分组

根据试验目的成型的混凝土试块的具体分组情况如表1所示。

试块S0为标准养护试件，作为基准件；试块S00为标准养护28d后直接进行再碱化的试件，目的是为了直接考察电化学再碱化对混凝土宏观性能和微观结构的影响；试块S31~S63为标准养护28d后经不同高温作用，再经过电化学再碱化修复的试件，其目的是为了考察再碱化对高温作用后混凝土宏观力学性能和微观结构的影响。

表1 再碱化试验参数

Table 1 The parameters of realkalization test

试件 编号	试件状态	电解液浓度/ (mol/L)	电流密度/ (A/m ²)	通电时间/ d
S0	标准养护			
S00	标准养护后再碱化	1	1	14
S31	300℃高温恒温6h			
S32	300℃高温恒温6h后再碱化	1	1	14
S33	300℃高温恒温6h后再碱化	1	1	21
S61	600℃高温恒温6h			
S62	600℃高温恒温6h后再碱化	1	1	14
S63	600℃高温恒温6h后再碱化	1	1	21

1.2 试验方法

1.2.1 高温试验

本试验采用型号为SX-12-12智能箱型电阻炉对试块进行高温试验。电阻炉的炉膛尺寸为500mm×300mm×200mm，额定功率为12kW，最高温度可达1200℃，炉膛温度可自动控制，并在达到指定温度后自动恒温。将养护至规定龄期的立方体试块表面晾干后，放入电阻炉内进行加温处理，达到指定温度(300℃和600℃)后，恒温6h。电阻炉断电后，打开炉门，待试块自然冷却至室温后进行再碱化试验。

1.2.2 电化学再碱化试验

电化学再碱化修复技术是基于通电后两极间发生电化学反应产生的OH⁻和高碱性电解质溶液通过电渗、电迁移、扩散和毛细管虹吸等作用进入混凝土基体内，从而实现混凝土高碱性的恢复。

将试块S00~S63按表1中的再碱化参数进行电化学再碱化试验。再碱化试验装置示意图如图1所示。

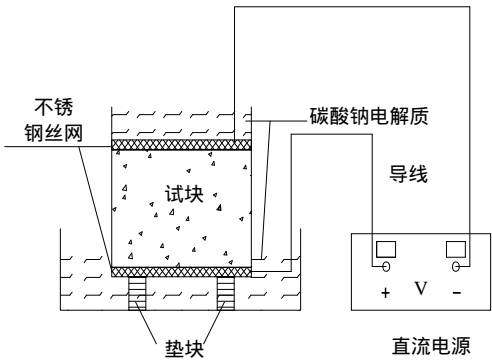


图1 再碱化试验装置示意图

Fig.1 Sketch map of the realkalization equipment

1.2.3 混凝土抗压强度试验

将试块S0~S63按《混凝土结构试验方法》(GB50152-92)中规定的标准加载速度匀速加载，进行混凝土立方体的抗压强度试验。试验加载装置如

图 2 所示。



图 2 抗压强度试验

Fig.2 The compressive strength test

1.2.4 压汞测孔法

压汞测孔法(Method of Mercury Intrusion Pore Measurement)是通过施加一定的压力克服毛细孔阻力向试样中压入汞的实验方法。该方法是根据压入多孔材料系统中汞的体积与所加压力之间的函数关系计算孔的直径和不同直径、大小孔的体积,由此测出材料中开口孔的状况。

将做完抗压强度试验后的试块 S0~S63 分别进行破碎,随机筛选 5mm 以下颗粒迅速浸泡于无水乙醇中终止其水化和碳化。在测孔前取出颗粒并在 105℃ 烘箱内烘 1h 以除去样品中的酒精及可蒸发水,试样烘干后在 Pore master5 型高压测孔仪上完成压汞实验。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

将试块 S31~S63 由常温分别加热到 300℃ 和 600℃ 恒温 6h 后,其物理状态逐渐发生变化,不同温度作用的混凝土及高温后经再碱化修复的混凝土试块表面特征变化情况如表 2 所示。

表 3 再碱化修复前后孔体积及孔分布

Table 3 Pore volume and pore size distributions before and after realkalization

试件 编号	孔体积/($\times 10^{-2} \cdot \text{cc/g}$)						孔径分布/(%)					
	\sum	$d < 30\text{nm}$	$30\text{nm} < d < 500\text{nm}$	$500\text{nm} < d < 1000\text{nm}$	$1000\text{nm} < d < 5000\text{nm}$	$d > 5000\text{nm}$	$d < 30\text{nm}$	$30\text{nm} < d < 500\text{nm}$	$500\text{nm} < d < 1000\text{nm}$	$1000\text{nm} < d < 5000\text{nm}$	$d > 5000\text{nm}$	
S0	5.226	2.553	2.583	0.089	0.001	48.85	49.42	1.71	0.02			
S00	3.888	1.748	1.627	0.262	0.251	44.96	41.85	6.73	6.46			
S31	5.043	1.421	2.791	0.245	0.586	28.18	55.35	4.86	11.61			
S32	1.824	0.990	0.681	0.128	0.025	54.11	37.51	7.00	1.38			
S33	1.121	0.272	0.725	0.112	0.012	24.17	64.82	9.94	1.03			
S61	8.010	0.701	4.683	0.626	2.000	8.75	58.44	7.81	25.00			
S62	2.465	1.294	0.493	0.176	0.502	52.48	20.03	7.13	20.36			
S63	1.297	0.687	0.099	0.150	0.361	53.00	7.60	11.53	27.87			

表 2 高温作用及经再碱化修复后的试块的表面特征

Table 2 Surface feature of specimens after high temperature and realkalization repairing

试件编号	颜色	裂缝	掉皮	缺角	疏松	喷洒 1% 酚酞试剂
S0	正常	无	无	无	无	紫红
S00	正常	无	无	无	无	深紫红
S31	泛红	细微、少	无	无	无	浅玫红
S32	泛红	裂缝减少	无	无	无	玫红
S33	泛红	裂缝减少	无	无	无	紫红
S61	浅灰白	细小、较多	少量	个别	轻度	不变色
S62	浅灰白	裂缝减少	少量	个别	轻度改善	玫红
S63	浅灰白	裂缝减少	少量	个别	轻度改善	玫红

2.2 抗压强度

图 3 为通过试验得到的各组试块的平均抗压强度柱状图。

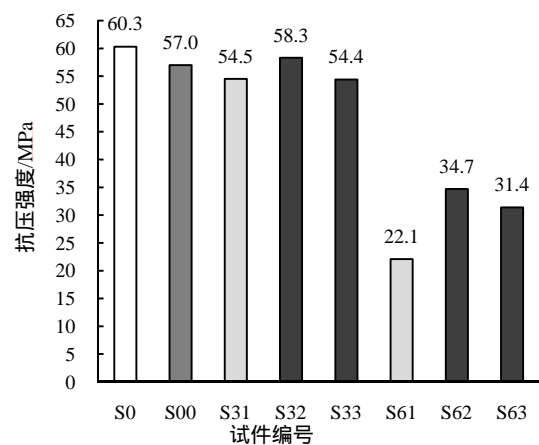


图 3 抗压强度柱状图

Fig.3 Compressive strength of specimens

2.3 孔结构

孔结构是混凝土微观结构的重要内容,它直接影响混凝土的宏观性能和耐久性。考虑到压汞测孔法的局限性,本文只研究孔径 $d < 5000\text{nm}$ 的孔体积及孔分布情况。运用压汞法获得的再碱化修复前后孔体积和孔分布情况如表 3 所示。

3 结果分析

3.1 高温后孔结构变化分析

图4分别给出了高温前后混凝土的孔体积变化和孔分布柱状图。

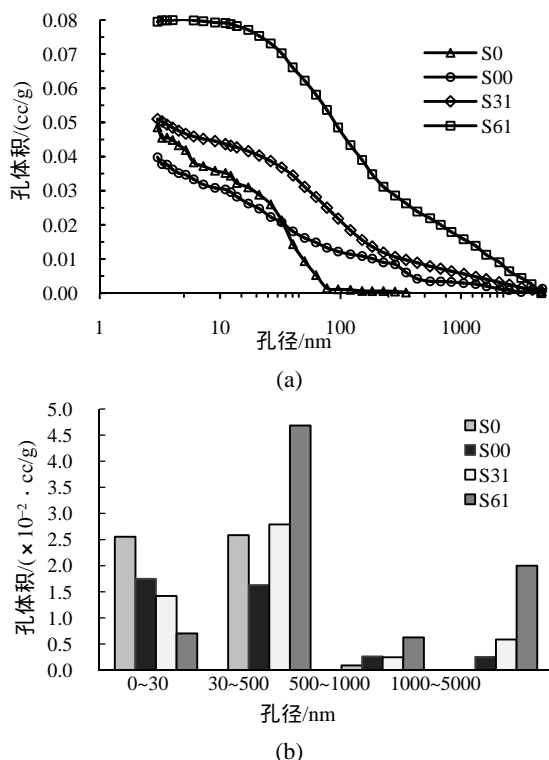


图4 高温前后混凝土的孔体积变化和孔分布柱状图

Fig.4 Variation of pore volume and pore size distribution before and after high temperatures

由图4和表3可以看出：试块S00与基准试块S0相比较，其微观结构中 $d < 500\text{nm}$ 的孔体积有所减小， $500\text{nm} < d < 5000\text{nm}$ 的孔体积有一定程度的增大，但是总孔体积呈现明显减小的趋势。这主要是由于在两端辅助电极作用下，混凝土内部将会发生一系列的物理和化学变化——电解水反应、电渗、扩散、毛细作用和电迁移等，气体和离子的扩散、电渗和迁移等作用破坏了混凝土内微细孔的孔壁结构；同时，又由于混凝土孔隙液中的 Ca^{2+} 和电解质溶液中的 CO_3^{2-} 反应产生难溶的 CaCO_3 ， CaCO_3 会堵塞一部分粗大孔，从而造成了再碱化后混凝土总孔体积的减小^[6]。试块S31与基准试块S0相比较，其微观结构中 $d < 30\text{nm}$ 的孔体积有一定程度的减小，这是由于混凝土中水化物开始脱水，吸附水及化学结合水开始丧失；但其总孔体积变化微小，这是由于200~300℃时，主要是混凝土内自由水的蒸发，这对混凝土整个微观结构相貌没有大的影响^[7]。同时，300℃高温作用时，混凝土会进一步进行化学

反应，C-S-H凝胶由于受热脱去部分化合水或结晶水，组织结构变得更加致密，水泥水化物比常温时增多，内部孔结构趋于密实^[8-10]。标准养护的混凝土经600℃高温作用后的试块S61与标准养护的混凝土试块S0相比较，其总孔体积有大幅度的增加，这是由于水泥石中的结晶水几乎全部丧失，水泥水化产物大部分分解，水化和未水化的颗粒之间的结合力松弛，水泥浆体结构部分破碎，C-S-H凝胶的网状结构开始破坏，从而导致微观结构组织变得松弛^[11-12]。

3.2 再碱化修复对孔结构的影响

图5和图6分别给出了300℃和600℃高温作用经再碱化修复前后混凝土的孔体积和孔分布变化图。

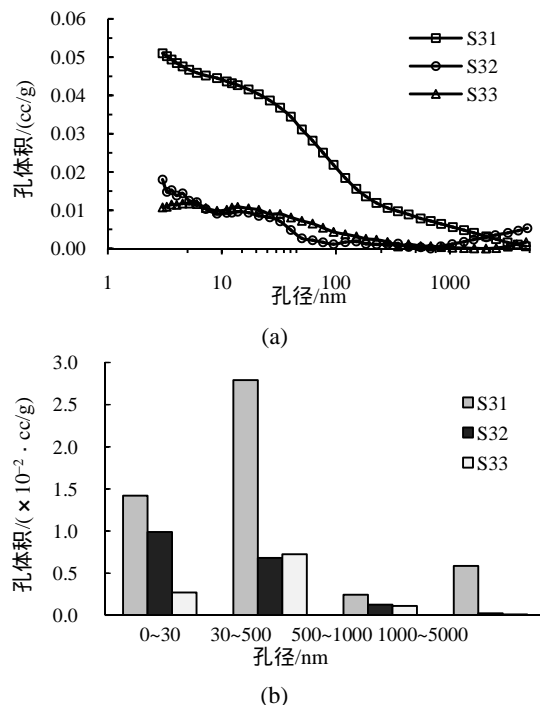
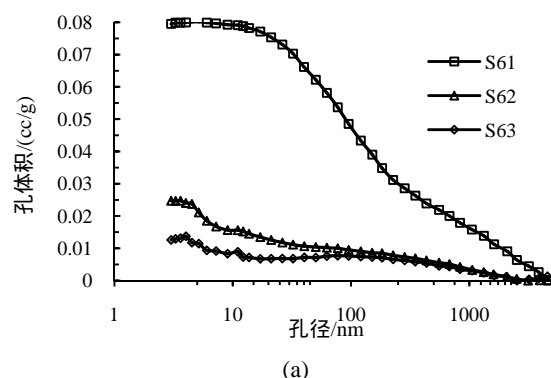


图5 300℃高温经再碱化修复前后混凝土的孔体积变化和孔分布柱状图

Fig.5 Variation of pore volume and pore size distribution before and after realkalization repairing after 300℃



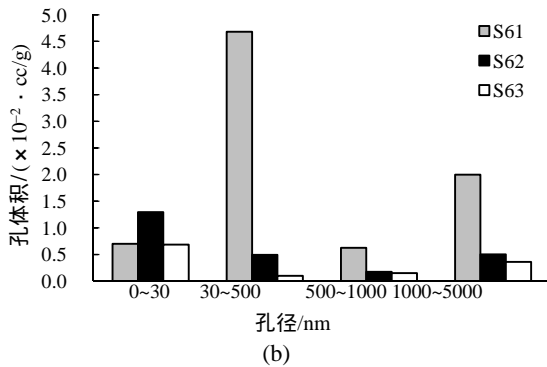


图6 600 高温经再碱化修复前后混凝土的孔体积变化和孔分布柱状图

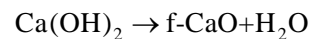
Fig.6 Variation of pore volume and pore size distribution before and after realkalization repairing after 600

由图5和表3可以看出：试块S32、试块S33与试块S31相比较，总孔体积大幅度减少，分别减少了63.85%和77.73%。试块S32与试块S31相比较，各级孔分布的孔体积均有大幅度的减少，其中 $d < 30\text{nm}$ 、 $30\text{nm} < d < 500\text{nm}$ 、 $500\text{nm} < d < 1000\text{nm}$ 及 $1000\text{nm} < d < 5000\text{nm}$ 的孔体积分别减少了30.33%、75.60%、47.78%和95.73%。试块S33与试块S31相比较，各级孔分布的孔体积也均有大幅度的减少，其中 $d < 30\text{nm}$ 、 $30\text{nm} < d < 500\text{nm}$ 、 $500\text{nm} < d < 1000\text{nm}$ 及 $1000\text{nm} < d < 5000\text{nm}$ 的孔体积分别减少了49.47%、74.02%、54.29%和97.95%。同时可以看出：试块S32、试块S33与试块S31的各级孔分布相比较， $1000\text{nm} < d < 5000\text{nm}$ 的粗大孔所占比例均有大幅度的降低，分别降低了88.11%和91.13%。

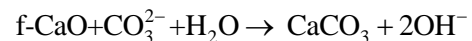
由图6和表3可以看出：试块S62、试块S63与试块S61相比较，总孔体积大幅度减少，分别减少了69.29%和83.81%。试块S62与试块S61相比较， $d < 30\text{nm}$ 的孔体积较有大幅度的增加，而 $d > 30\text{nm}$ 的各级孔分布的孔体积均有大幅度的减少，其中 $d < 30\text{nm}$ 的孔体积增加了84.59%，而 $30\text{nm} < d < 500\text{nm}$ 、 $500\text{nm} < d < 1000\text{nm}$ 及 $1000\text{nm} < d < 5000\text{nm}$ 的孔体积分别减少了89.47%、71.88%和74.90%。试块S63与试块S61相比较，各级孔分布的孔体积除了 $d < 30\text{nm}$ 的孔体积仅减少了2.00%以外，其他各级孔分布的孔体积均有较大幅度的减少，其中 $30\text{nm} < d < 500\text{nm}$ 、 $500\text{nm} < d < 1000\text{nm}$ 及 $1000\text{nm} < d < 5000\text{nm}$ 的孔体积分别减少了97.89%、76.04%和81.95%。同时可以看出：试块S62与试块S61的各级孔分布相比较， $500\text{nm} < d < 5000\text{nm}$ 的粗大孔所占比例有一定程度的降低，降低了16.21%； $30\text{nm} < d < 500\text{nm}$ 的细小孔所占比例有大幅

度的降低，降低了38.41%； $d < 30\text{nm}$ 的微细孔所占比例有大幅度的提高，提高了44.25%。试块S63与试块S61的各级孔分布相比较， $500\text{nm} < d < 5000\text{nm}$ 的粗大孔所占比例有一定程度的提高，提高了20.09%； $30\text{nm} < d < 500\text{nm}$ 的细小孔所占比例有大幅度的降低，降低了50.84%； $d < 30\text{nm}$ 的微细孔所占比例有大幅度的提高，提高了43.73%。

由上述试验结果可以看出，经过再碱化修复后混凝土中总孔体积有大幅度的减少，粗大孔的体积均明显减少。分析其原因，是由于高温作用中，混凝土中水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 受热分解，释放出化学结合水：



$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 脱水崩解后形成具有高度反应活性的游离化f-CaO微粒^[11]。当高温作用后的试块再碱化通电修复时，试块两端的辅助电极之间形成了电场， Na_2CO_3 电解液中 CO_3^{2-} 在电场作用下通过电渗、电迁移、扩散及毛细管虹吸等运动进入到混凝土孔隙液中。游离化f-CaO微粒与孔隙液中的 CO_3^{2-} 和 H_2O 结合：



生成的难溶物质 CaCO_3 重新填充了混凝土中由于高温作用产生的大孔和贯通孔，从而减少了混凝土中总孔体积和粗大孔的体积。

3.3 再碱化修复对抗压强度的影响

由本试验结果可以看出，随着作用温度的升高，混凝土的抗压强度呈下降趋势。试块S00与基准试块S0相比较，抗压强度略有降低，但降低幅度不大，降低了5.47%，表明电化学再碱化对未损伤混凝土的抗压强度副作用影响不大。试块S32和试块S62分别与试块S31和试块S61相比较，抗压强度均有明显提高，提高幅度分别为7.89%和57.01%。试块S33与试块S31相比较，抗压强度变化不明显；试块S33与试块S32相比较，抗压强度有所降低，降低幅度为6.69%。试块S63与试块S61相比较，抗压强度有明显提高，提高幅度为42.08%；试块S63与试块S62相比较，抗压强度有所降低，降低幅度为9.51%。试验结果表明：高温受损的混凝土经电化学再碱化修复后，其抗压强度得到明显的提高。但是，并非再碱化修复时间越长，对混凝土抗压强度修复的效果越好，所以选择合理的再碱化时间对高温后混凝土抗压强度的再碱化修复具有重要意义。

分析试验结果产生的原因,主要是由于当 $T=300$ 时,混凝土内的自由水全部蒸发,水泥胶凝体中的结合水开始脱出,胶合作用的加强缓和了缝端的应力集中,有利于强度的提高。粗细骨料和水泥浆体的温度膨胀系数值不等,应变差的增大使骨料界面形成裂纹,削弱了混凝土的强度。这些矛盾的因素同时作用,使这一温度区段的抗压强度变化复杂。当 $T=400$ 时,混凝土内水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 脱水,体积膨胀,促使裂缝扩展,导致抗压强度显著下降。当 $T=500$ 后,结晶水几乎全部丧失,水泥水化物分解殆尽,骨料相开始脱水,混凝土表面出现明显裂纹,骨料和水泥浆体的温度变形差继续加大,接口裂缝不断开展和延伸^[13]。由本文 3.2 节关于再碱化修复对孔结构影响的分析,可知水泥水化物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 脱水崩解后形成的高度反应活性游离化 f-CaO 微粒与孔隙液中的 CO_3^{2-} 和 H_2O 结合,生成的 CaCO_3 重新填充了混凝土中由于高温作用产生的大孔和贯通孔。经再碱化修复后的混凝土微观结构较高温作用未修复前的更加致密,混凝土的抗压强度得到了修复和提高。

3.4 再碱化时间对孔结构的影响

由图 5、图 6 和表 3 可以看出:试块 S32、试块 S33 与试块 S31 相比较,混凝土的总孔体积随着再碱化时间的增长,呈现减少的趋势,分别减少了 63.83% 和 77.77%;试块 S62、试块 S63 与试块 S61 相比较,混凝土的总孔体积随着再碱化时间的增长,呈现减少的趋势,分别减少了 69.23% 和 83.81%。但是,300 和 600 高温作用分别经再碱化修复 14d 和 21d 后的试块中,混凝土各级孔分布的孔体积随再碱化时间的增长而变化的规律不一致,还有待于今后开展进一步的试验研究。

4 结论

通过电化学再碱化对高温后混凝土的微观结构和抗压强度修复的试验研究,得到如下初步结论:

(1)标准养护试块直接再碱化后,混凝土的总孔体积有明显减少;混凝土的抗压强度略有下降,但下降幅度很小,在工程允许偏差范围内。

(2)高温后,混凝土的抗压强度呈下降趋势,所受温度越高,下降幅度也越大;经过再碱化修复后,明显改善了混凝土的高温后剩余抗压强度。

(3)高温作用经再碱化修复后,混凝土微观结构的变化与其宏观力学性能的变化是一致的。随温度

的升高,混凝土微观结构逐渐变得松散,孔隙率逐渐上升,粗大孔逐渐增多,且相互贯通,宏观力学性能随之劣化;经过再碱化修复后,混凝土中的大孔、有害孔明显减少,孔隙率大幅度下降,混凝土的微观结构和宏观力学性能得到明显改善和修复,有利于提高混凝土抗渗性和耐久性。

(4)高温作用经不同再碱化时间修复后,混凝土的微观结构和宏观力学性能得到改善和修复的效果有所不同。随着再碱化时间的增长,混凝土的总孔体积呈现减少的趋势,但是效果与再碱化时间并不是成正比的关系。

参考文献:

- [1] 李宁波, 时旭东, 肖明辉. 高温后混凝土受压强度衰减性能试验研究[J]. 建筑科学, 2007, 23(9): 58-62.
Li Ningbo, Shi Xudong, Xiao Minghui. Experimental investigation on compressive strength decaying behaviors of concrete after elevated temperature [J]. Building Science, 2007, 23(9): 58-62. (in Chinese)
- [2] 吴波, 袁杰, 杨成山. 高温后高强混凝土的微观结构分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(3): 8-12.
Wu Bo, Yuan Jie, Yang Chengshan. Analysis of the microstructure of HSC after high temperature [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1999, 32(3): 8-12. (in Chinese)
- [3] 吕天启, 赵国藩, 林志伸. 高温后静置混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 63-70.
Lü Tianqi, Zhao Guofan, Lin Zhishen. Experimental study on mechanical properties of long standing concrete after exposure to high temperature [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(1): 63-70. (in Chinese)
- [4] 冯竟竟, 傅宇方, 陈忠辉, 等. 高温对水泥基材料微观结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 318-322.
Feng Jingjing, Fu Yufang, Chen Zhonghui, et al. Effect of high temperatures on microstructure of cement-based composite material [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(3): 318-322. (in Chinese)
- [5] 柳献, 袁勇, 叶光, 等. 高性能混凝土高温微观结构演化研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(11): 1473-1478.
Liu Xian, Yuan Yong, Ye Guang, et al. Study on pore structure evolution of high performance concrete with elevated temperatures [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, 36(11): 1473-1478. (in Chinese)
- [6] 熊焱. 碳化混凝土结构再碱化技术试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
Xiong Yan. Experimental study on realkalization technique for carbonated concrete structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)

- [7] 徐戡, 徐志胜, 朱玛, 等. 高温作用后混凝土强度与变形试验研究[J]. 长沙铁道学院学报, 2000, 18(2): 13 16.
Xu Yu, Xu Zhisheng, Zhu Ma, et al. Experiment investigation of strength and reformation of concrete after high temperature [J]. Journal of Changsha Railway University, 2000, 18(2): 13 16. (in Chinese)
- [8] 杨淑慧, 高丹盈, 赵军. 高温作用后矿渣微粉纤维混凝土的微观结构[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(增刊 2): 102 106.
Yang Shuhui, GaoDanying, Zhao Jun. Microstructure of fiber reinforced concrete with slag power after effect of high temperatures [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(Suppl2): 102 106. (in Chinese)
- [9] Omer Ario. Effects of elevated temperatures on properties of concrete [J]. Fire Safety Journal, 2007, 42(8): 516 522.
- [10] Kodur VKR, Sultan MA. Effect of temperature on thermal properties high-strength concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15 (2): 101 107.
- [11] 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: 大连理工大学, 2006.
XuZeJing. Experimental research on material characteristic and life pre-estimate and repairing of reinforcing concrete structure after fire [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [12] Chen Bing, Li Chunling, Chen Longzhu. Experimental study of mechanical properties of normal-strength concrete exposed to high temperatures at an early age [J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(7): 997 1002.
- [13] 吕天启, 赵国藩, 林志伸, 等. 高温后静置混凝土的微观分析[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(2): 135 141.
Lü Tianqi, Zhao Guofan, Lin Zhishen, et al. Microscopic analysis of long standing concrete after high temperature [J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(2): 135 141. (in Chinese)

(上接第 196 页)

参考文献:

- [1] Newman G M, Robinson J T, Bailey C G. Fire safe design: A new approach to multi-storey steel-framed buildings [M]. UK: The Steel Construction Institute, 2006.
- [2] DassaultSystemesSimulia Corp. Abaqusoverview [OL]. <http://www.3ds.com/cn/products/simulia/portfolio/abaqus/overview/>, 2012.
- [3] Ansys, Inc. ANSYS mechanical products [OL]. <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Structural+Mechanics/ANSYS+Mechanical>, 2011.
- [4] Vulcan Solutions Ltd. Vulcan solutions software [OL]. <http://www.vulcan-solutions.com/software.html>, 2011.
- [5] Franssen JM. SAFIR: A thermal/structural program modelling structures under fire [J]. Engineering Journal, 2005, 42(3): 143 158.
- [6] GB/T 9978-1999, 建筑构件耐火试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
GB/T 9978-1999, Fire-resistance tests-Elements of building construction [S]. Beijing: China Standard Press, 1999. (in Chinese)
- [7] Zhong H, Gao M. Quadrature element analysis of planar frameworks [J]. Archive of Applied Mechanics, 2010, 80: 1391 1405.
- [8] Xiao Naijia, ZhongHongzhi. Non-linear quadrature element analysis of planar frames based on geometrically exact beam theory [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2012, 47(5): 481 488.
- [9] Zhong H, Yu T. Flexural vibration analysis of an eccentric annular Mindlin plate [J]. Archive of Applied Mechanics, 2007, 77: 185 195..
- [10] Zhong H, Yu T. A weak-form quadrature element method for plane elasticity problems [J]. Applied Mathematical Modeling, 2009, 33(10): 3801 3814.
- [11] CEN, BS EN 1993-1-2: 2005, Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-2: General rules-structural fire design [S]. UK: British Standard Institution, 2005.
- [12] Davis P I, Rabinowitz P. Methods of numerical integration [M]. 2nd ed. Orlando: Academic Press, 1984: 104 105.