

## 不同程度火灾破坏对钢筋混凝土材料的影响

童芸芸<sup>1</sup>, 马超<sup>1</sup>, 吕伟加<sup>2</sup>

(1. 浙江科技学院 土木与建筑工程学院, 杭州 310023; 2. 杭州聚代科技有限公司, 杭州 310014)

**摘要:** 在模拟了轻度火灾破坏(300 °C, 1 h)、中度火灾破坏(500 °C, 1 h)和重度火灾破坏(800 °C, 1 h)3种情况后,比较了3种不同程度火灾破坏后钢筋混凝土试件表面形貌、抗压强度和混凝土 pH 值的变化。结果表明,随着火灾温度的升高,钢筋混凝土试块表面颜色由青变白,先出现横向裂缝,后出现纵向裂缝,并逐渐增多;试块的抗压强度逐渐下降,且下降明显;混凝土的 pH 值在轻度火灾破坏后仍具有高碱性,但是在中度和重度火灾破坏后不再具有高碱性。

**关键词:** 火灾破坏;钢筋混凝土;抗压强度;pH值;钝化膜

中图分类号: TU502

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2016)05-0379-05

## Influence of different degrees of fire damage on reinforced concrete material

TONG Yunyun<sup>1</sup>, MA Chao<sup>1</sup>, LYU Weijia<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China; 2. Hangzhou Judai Technology Co. Ltd., Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Moderate fire damage at 300 °C during one hour, medium fire damage at 500 °C during one hour and heavy fire damage at 800 °C during one hour are simulated in laboratory. The change of concrete surface color, the evolution of compressive strength and especially the pH value of concrete after fire damage at different temperatures are compared and analyzed. The results reveal that with the increase of the temperatures, the concrete surface color turns from cyan to white, along with the horizontal fissures and the vertical fissures in succession. Moreover, the compressive strength decreases significantly. The pH value of concrete is still in the range of high alkalinity after moderate fire damage, but the concrete has no more high

---

收稿日期: 2016-10-01

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目(51408546);浙江省自然科学基金青年基金项目(LQ14E080008);浙江省文物保护科技项目(2015018);浙江省公益性技术应用研究计划项目(2015C33058)

**作者简介:** 童芸芸(1978—),女,浙江省淳安人,副教授,博士,主要从事钢筋混凝土的耐久性研究。

alkalinity after medium and heavy fire damage.

**Keywords:** fire damage; reinforced concrete; compressive strength; pH value; passivation layer

火灾不仅是古代木结构建筑破坏的主要原因之一,也是现代钢筋混凝土建筑破坏的重要隐患,这是因为在火灾发生过程中,随着温度的升高,钢筋混凝土构件会发生以下常见的破坏<sup>[1-4]</sup>:

火灾过程中,混凝土本身会由于温度的上升而发生一定的物理化学变化。一般认为,温度上升到 100 ℃时,混凝土内的自由水会蒸发;温度上升到 200~300 ℃时,水化硅酸钙的层间水和硫铝酸钙的结合水散失;温度上升到 500 ℃左右时,混凝土中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  受热分解;而 800~900 ℃的高温会造成水化硅酸钙的分解。同时,混凝土中的骨料也会因为受热而体积膨胀甚至爆裂,原来意义上的混凝土已不复存在。

火灾过程中的温度的升高和降低会引起钢筋混凝土构件膨胀或收缩不均匀,进而产生纵向和横向的裂缝。

可以注意到,随着温度的升高,伴随着  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  受热分解,混凝土间隙液的 pH 值会有所下降。混凝土间隙液的高碱性环境是钢筋不被腐蚀的天然屏障,一旦失去了这个高碱性环境的保护,火灾受损后混凝土中钢筋的腐蚀破坏将是钢筋混凝土结构稳定的大患<sup>[5-6]</sup>。截至目前,鲜有文献对火灾受损后混凝土的 pH 值进行量化分析<sup>[7]</sup>。本研究模拟不同温度下的火灾对钢筋混凝土的破坏,比较了火灾破坏后混凝土表观形貌和抗压强度的变化,着重分析了不同温度火灾破坏后混凝土 pH 值的变化,以进一步研究火灾破坏对钢筋腐蚀的影响。

## 1 实验方案设计与过程

### 1.1 试样准备

试块为 4 块采用浙江钱潮控股集团生产的普通硅酸盐水泥(P. O. 42. 5)、山砂和碎石(最大粒径 16 mm)制成的钢筋混凝土立方体试件(100 mm×100 mm×100 mm)。为了模拟高孔隙率的劣质混凝土材料,试块的混凝土配合比 $[m(\text{水}):m(\text{水泥}):m(\text{石子}):m(\text{砂})=0.65:1:5.78:4.1]$ 选择较高水灰比(0.65)。试块中间高度位置有两根长 180 mm 平行摆放的光圆钢筋(直径为 6 mm,如图 1 所示),其中部 80 mm 长直接埋于混凝土中,两头各有 50 mm 长的部分由环氧树脂涂层保护,目的是防止外界环境对钢筋的腐蚀。

试块在标准条件下[温度为 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 95%以上]养护 28 d 后,将各个钢筋混凝土试块依次编号为 R、1、2 和 3,其中 R 为参比试块。

### 1.2 模拟火灾实验

实验室采用上海皓越 HMF-1600 高温炉(常温至 1 600 ℃可调;可编程温控),设计不同的温度,模拟不同程度的火灾状况。试块 R 为参比试块,不经任何高温处理;试块 1 放置于高温炉中,经历 0.5 h 升温阶段,1 h 实验温度(300 ℃)阶段和 0.5 h 降温阶段,以模拟轻度火灾对钢筋混凝土的破坏;试块 2 放置于高温炉中,经历 0.5 h 升温阶段,1 h 实验温度(500 ℃)阶段和 0.5 h 降温阶段,以模拟中度火灾对钢筋混凝土的破坏;试块 3 放置于高温炉中,经历 0.5 h 升温阶段,1 h 实验温度(800 ℃)阶段和 0.5 h 降温阶段,以模拟重度火灾对钢筋混凝土的破坏。

### 1.3 抗压强度实验

模拟火灾实验后,实验采用 LM-02 型数字式测力仪(图 2),测试钢筋混凝土试块的抗压强度,混凝土的强度等级小于 C30 时,其加荷速率为 0.3~0.5 MPa/s。抗压实



图 1 钢筋混凝土试块

Fig. 1 Reinforced concrete samples

验后,测力仪显示破坏荷载(N),试块的抗压强度  $P(\text{MPa}) = \text{试块破坏荷载}(\text{N}) / \text{试块承压面积}(100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm})$ 。

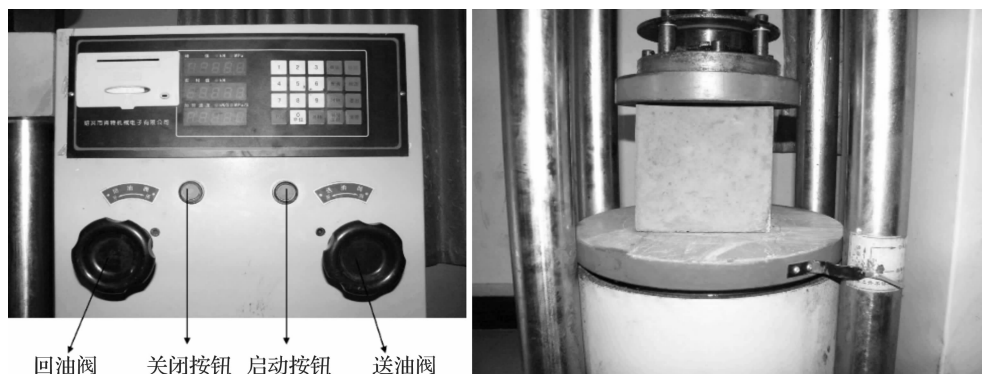


图2 LM-02 型数字式测力仪和试件抗压实验

Fig. 2 LM-02 digital dynamometer and compressive strength tests of samples

#### 1.4 混凝土 pH 值测定

抗压实验后,混凝土碎块一部分被用于混凝土的 pH 值检测。实验采用取出固液萃取法测定混凝土的 pH 值<sup>[8]</sup>。测定前先利用密闭式化验制样粉碎机将混凝土粉碎,经过  $315 \mu\text{m}$  筛子筛分后制成需要的混凝土粉样。

取出固液萃取法测定混凝土 pH 值的具体过程是,先取 5 g 粉末放入盛有 15 mL 蒸馏水的烧杯中,然后烧杯放置在磁力搅拌器上,开机搅拌 15 min,搅拌完成后,烧杯静置沉淀 1 min,然后将烧杯中的液体表面悬浮液倒入试验瓶中,用 pH 测试仪测定粉末悬浮液的 pH 值。在测定每份样品前,都需要在用蒸馏水对 pH 测试仪的探头进行清洗后,方可进行下一次测定工作。因该 pH 测试仪较为精密,探头较为敏感,如果清洗不当,会导致上一次测试溶液仍有残留,影响下一次测定结果的准确性。

### 2 实验结果与分析

#### 2.1 模拟火灾破坏实验

通过观察钢筋混凝土试块在轻度( $300^\circ\text{C}$ , 1 h)、中度( $500^\circ\text{C}$ , 1 h)和重度( $800^\circ\text{C}$ , 1 h)火灾破坏模拟实验前后试块混凝土表面颜色和裂缝等外观变化,初步确定及评判不同程度火灾对钢筋混凝土材料的破坏程度<sup>[9]</sup>。

3 种不同程度火灾破坏模拟实验后,钢筋混凝土试块的表观形貌如图 3 所示。可以发现,未经火灾破坏的混凝土表面呈砖青色,且没有裂缝;经过轻度火灾破坏的试块表面颜色变化不明显,整体仍为青色,部分表面掺杂土红色,但混凝土试块表面完好,无裂缝;经过中度火灾破坏的试块表面呈现不均匀的青白相间的颜色,而且混凝土试块表面有裂缝出现,裂缝宽度不足 1 mm,以横向裂缝居多,纵向较少;经过重度火灾破坏的试块表面整体变成了灰白色,而且混凝土试块表面有较多裂缝产生,横、纵、斜向均有,且裂缝较宽,部分裂缝宽达 2 mm。

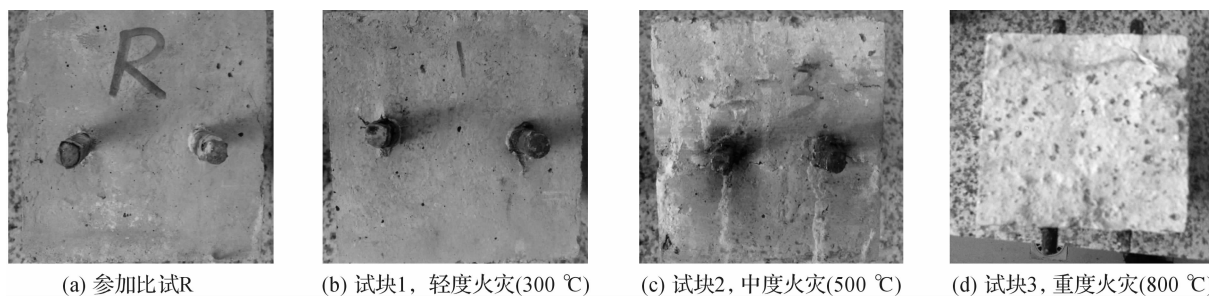


图3 火灾破坏后混凝土外观

Fig. 3 Concrete surface after fire damage at different temperatures

## 2.2 钢筋混凝土试件的抗压强度

参比试块 R 和试块 1~3 在轻度、中度和重度火灾破坏模拟实验后,在恒温恒湿[温度为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $(60\pm 10)\%$ ]的实验室放置 7 d,然后被用于抗压强度测试。结果表明,参比试块 R 的抗压强度为 26.92 MPa;历经  $300^{\circ}\text{C}$  高温 1 h 破坏后,抗压强度为 21.59 MPa,较参比试块下降了 19.8%;历经  $500^{\circ}\text{C}$  高温 1 h 破坏后,抗压强度下降为 18.21 MPa,较参比试块下降了 32.4%;历经  $800^{\circ}\text{C}$  高温 1 h 破坏后,抗压强度继续下降为 9.49 MPa,较参比试块下降了 64.7%(表 1)。随着火灾破坏温度的上升,火灾破坏程度的增加,试块的抗压强度逐渐减小,且下降显著。这与随着温度的升高,试块横向、竖向和斜向裂缝增多的表观分析结果是一致的。

当温度升至  $300^{\circ}\text{C}$  时,混凝土内自由水蒸发,结合水散失,水泥浆体的孔隙率增大,并出现裂缝,结构变疏松,导致混凝土抗压强度下降;当温度升至  $500^{\circ}\text{C}$  时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  开始分解,原本结晶完整的片层结构遭到破坏,同时骨料也受热膨胀,导致混凝土产生裂缝,强度继续下降;当温度升至  $800^{\circ}\text{C}$  时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  大量分解,导致水泥石结构破坏,骨料受热膨胀加剧,混凝土裂缝数量增加,导致混凝土强度进一步明显降低<sup>[6]</sup>。

由此可见,不同温度对混凝土的骨料和水泥浆体有不同程度的破坏作用,随着温度的升高,破坏程度增加,钢筋混凝土试块的抗压强度下降。

## 2.3 混凝土的 pH 值

抗压实验后,混凝土碎块被按要求(碾碎再经  $315\ \mu\text{m}$  筛子筛分)制成需要的粉末,采用取出固液萃取法测得混凝土悬浮液的 pH 值,结果如表 2 所示,表中数据为 3 次测试结果的平均值,它们的标准偏差均为 0.005。测试结果表明,参比试块的混凝土 pH 值为 12.68,这个值处于正常的未受污染混凝土的 pH 值的范围内(12.5~13.5);历经  $300^{\circ}\text{C}$  高温 1 h 破坏后,pH 值减小为 12.13,但仍具有高碱性;历经  $500^{\circ}\text{C}$  高温 1 h 破坏后,pH 值继续减小到 11.56;历经  $800^{\circ}\text{C}$  高温 1 h 破坏后,pH 值仅为 10.88,混凝土碱性下降明显。由此可见,随着火灾破坏温度的上升,混凝土的 pH 值逐渐减小,即

表 1 参比试块和不同温度火灾破坏后  
钢筋混凝土试块的抗压强度值

Table 1 Compressive strength of reference sample and samples after fire damage at different temperatures

试块	火灾温度/ $^{\circ}\text{C}$	抗压强度/MPa
参比试块 R		26.92
试块 1	300	21.59
试块 2	500	18.21
试块 3	800	9.49

表 2 参比试块和不同温度火灾破坏后混凝土的 pH 值

Table 2 pH value of concrete of reference sample and samples after fire damage at different temperatures

试块	火灾温度/ $^{\circ}\text{C}$	pH 平均值	标准偏差
参比试块 R		12.68	0.005
试块 1	300	12.13	0.005
试块 2	500	11.56	0.005
试块 3	800	10.87	0.005

混凝土间隙液的碱性逐渐降低。轻度火灾破坏后,混凝土仍具有高碱性;中度和重度火灾破坏后,混凝土不再具有高碱性,趋于中性。研究人员通过实验研究发现<sup>[1-4]</sup>,当火灾温度达到  $547^{\circ}\text{C}$  时,混凝土中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  会分解,使混凝土的碱性环境遭到破坏,趋于中性。这与本研究对不同温度的火灾后混凝土 pH 值的量化结果是一致的。同时,未受污染的混凝土的 pH 值在 12.5~13.5 之间,可以保证与之接触的钢筋表面处于钝化状态,腐蚀不再进行。但是,如果混凝土的碱性下降,会导致钢筋表面的钝化膜破坏,腐蚀不断进行。因此,火灾不仅会降低混凝土内部的碱性环境,使混凝土对钢筋的保护失去作用,且火灾温度越高,造成的破坏程度越严重。

## 3 结 语

为了研究不同程度火灾破坏对混凝土的影响,课题组利用高温炉实验室模拟了轻度火灾破坏、中度火灾破坏和重度火灾破坏 3 种情况,比较了 3 种不同程度火灾破坏后钢筋混凝土试件的表观形貌、抗压强度及混凝土 pH 值的变化。实验结果表明:轻度火灾破坏后,试块表面颜色变化不明显,混凝土表面完

好,无裂缝,抗压强度较参比试块下降了 19.8%,同时混凝土的 pH 值减小为 12.13,但仍处于高碱性范畴,不会影响钢筋的钝化膜环境;中度火灾破坏后,试块表面呈现不均匀的青白相间的颜色,有裂缝出现,裂缝宽度不足 1 mm,以横向裂缝居多,纵向较少,钢筋混凝土试块抗压强度较参比试块下降明显,减小了 32.4%,同时混凝土的 pH 值减小到 12 以下,pH 值为 11.56,钢筋的钝化膜环境可能会受到影响;重度火灾破坏后,试块表面整体变成了灰白色,而且混凝土表面有较多裂缝产生,横、纵、斜向均有,且裂缝较宽,部分裂缝宽达 2 mm,钢筋混凝土试块抗压强度较参比试块下降非常显著,减小了 64.7%,同时混凝土的 pH 值继续减小到 10.88,这个趋于中性的混凝土环境不再是钢筋的天然保护屏障。

由此可见,不同程度火灾对钢筋混凝土材料造成的破坏程度是有一定区别的,火灾温度越高,造成的破坏程度越大。本次实验量化了不同温度火灾损伤后混凝土的 pH 值,明确指出中度和重度火灾模拟实验后混凝土的碱性下降明显,并趋于中性,可作为进一步研究火灾受损后钢筋的腐蚀环境的变化之参考<sup>[10]</sup>。

关于不同程度火灾对钢筋混凝土材料的破坏的实验研究是在理想状态下进行的,实验室的研究环境与条件远不能与实际火灾现场对等,实际火灾现场的温度、场地环境及条件都要复杂的多,若要在此领域进行更加深入的研究,则需要进一步去实际火灾现场进行试验。

#### 参考文献:

- [1] 苗春,张雄,杜红秀. 火灾混凝土结构损伤检测技术进展[J]. 无损检测,2004,26(2):77.
- [2] 王济伟,李凯东,于春. 遭受火灾混凝土结构的检测鉴定[J]. 辽宁建材,2009(4):43.
- [3] 林志明,张雄. 火灾混凝土损伤诊断的进展[J]. 建筑材料学报,2002,5(4):347.
- [4] 王增泽,贾玉生,尹茂树. 遭受火灾混凝土结构的检测鉴定[J]. 辽宁建筑,1997(5):1.
- [5] 邹云华,张雄,林志明. 火灾后钢筋混凝土电化学再碱化技术的研究[J]. 新型建筑材料,2004(2):62.
- [6] 杜红秀,张雄. 火灾混凝土钢筋损伤的电化学检测与评估[J]. 建筑材料学报,2006,9(6):660.
- [7] 刘梅,赵东拂,韩箫. 火灾后混凝土结构损伤评估方法研究[J]. 工程抗震与加固改造,2014,16(增刊):69.
- [8] RÄSÄNEN V, PENTTALA V. The pH measurement of concrete and smoothing mortar using a concrete powder suspension[J]. Cement and Concrete Research,2004(34):813.
- [9] 张弼伟. 火灾后混凝土结构外观情况与烧灼深度的分析[J]. 山西建筑,2011,37(22):51.
- [10] COLOMBO M, FELICETTI R. New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures[J]. Fire Safety Journal,2007(42):461.