

不同配合比再生混凝土高温后的残余抗压强度

吴耀鹏¹, 李晓蕾¹, 姜厚文², 张 冲¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 山西晋投玄武岩开发有限公司, 山西 大同 037000)

摘要: 浇筑 15 种配合比的 100 mm×100 mm×100 mm 混凝土立方体试件, 将不同水胶比(0.34、0.4 和 0.5)、不同粉煤灰掺量(0%、30%和 50%)的普通混凝土和再生混凝土试件经 200~800 °C 高温处理后进行静压试验, 并测得其抗压强度。结果表明: 经 400 °C 高温作用后, 不同于普通混凝土, 水胶比为 0.34 时的再生混凝土强度低于水胶比为 0.4 时的强度; 对于不同配合比混凝土试件, 高温时的强度损失率, 低水胶比时较高水胶比时大; 粉煤灰的微集料效应可以弥补低水胶比下水泥浆与再生骨料结合面不良的缺陷; 粉煤灰的二次水化作用可以有效弥补再生混凝土因高温作用引起的强度损失。

关键词: 高温; 再生混凝土; 水胶比; 粉煤灰

中图分类号: TU502.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)03-0375-07

Residual compressive strength of recycled aggregate concrete with the different mixture ratio after high temperature

WU Yaopeng¹, LI Xiaolei¹, JIANG Houwen², ZHANG Chong¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shanxi Ecic Basalt Development Co., LTD, Datong 037000, China)

Abstract: The concrete cube specimens (100 mm×100 mm×100 mm) with 15 kinds of mixture ratios were cast. And the compressive strengths of ordinary and recycled aggregate concrete with different water-binder ratios (0.34, 0.4, and 0.5) and fly-ash dosage (0%, 30%, and 50%) were tested after exposure to high temperature (200~800 °C). The results show that after exposure to 400 °C, the compressive strength of recycled aggregate concrete at low water-binder ratio (0.34) is lower than at high water-binder ratio (0.4), which is different from the ordinary concrete. In addition, the compressive strength loss rate of the specimens with lower water-binder ratio is larger than the higher one. The micro-aggregate effect of fly-ash can remedy the poor surface combination between cement and recycled aggregates, especially at low water-binder ratio. And the secondary hydration of fly-ash can compensate for the strength loss of recycled aggregate concrete because of high temperature.

Key words: high temperature; recycled aggregate concrete; water-binder ratio; fly-ash

房屋拆迁及地震作用将产生大量建筑垃圾, 作为可回收利用建筑垃圾的再生混凝土日益受到人们的重视^[1-3]。影响再生混凝土强度的因素较复杂, 例如水胶比^[4]、再生骨料取代率^[5]、掺合料^[6-8]、骨料级配^[9]、破碎过程^[10]、原始废旧混凝土的强度等级^[11]、老砂浆含量^[12-13]等, 因此有必要对再生混凝土的材料性能进行详尽研究。作为配合比中的基本参数, 水胶比是影响混凝土强度的重要因素^[14-15]。而掺合料方面, 曾被认为是火电厂副产品的粉煤灰经过众多学者的研究和发展, 已被广泛应用于混凝土材料中^[16-17]。如我国的长江三峡大坝, 在混凝土中掺入了 30% 的粉煤灰; 美国佛罗里达州的一座海边高架桥, 在混凝土中掺入了高达 50% 的粉煤灰。

近年来, 再生混凝土高温后的性能研究已取

得系列成果。苏益声等^[18]对高温后再生混凝土圆柱体试件进行了常规三轴加载试验, 获得了再生混凝土应力—应变全过程曲线。结果表明: 在单向应力下, 高温后再生混凝土应力—应变全过程曲线有比较明显的尖峰。随着侧向围压的增加, 高温后再生混凝土应力—应变全过程曲线逐渐变得平缓 and 丰满。徐明等^[19]分析了不同再生粗、细骨料取代情况和经历温度对再生混凝土峰值应力、峰值应变、弹性模量、泊松比和单轴受压应力—应变全曲线的影响, 建立了各组再生混凝土试件单轴受压分段式应力—应变本构方程。冯超等^[20]配制 C30 全天然骨料混凝土和全再生骨料混凝土, 利用超景深三维显微系统观察经 0、300、400、500 °C 作用后混凝土的微观结构形貌, 对比分析骨料和砂浆的界面特征, 并从微观角度解释

收稿日期: 2016-06-25

修改稿日期: 2017-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108371); 陕西省自然科学基金资助项目(2015JM5164); 西安市工业应用技术研发基金资助项目(CXY1432(4)); 陕西省教育厅重点实验室科研计划基金资助项目(16JS050)

作者简介: 吴耀鹏(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构抗火研究。E-mail: wyp@xauat.edu.cn

界面特征对宏观受压破坏现象产生的影响. 万夫雄等^[21]进行了再生混凝土高温后经历自然冷却和水冷却后的抗压强度试验, 基于试验结果, 建立了再生混凝土高温后自冷和水冷后的强度计算公式. 结果表明: 低于 600 ℃ 时再生混凝土高温后水冷比自冷的强度低很多, 但 600 ℃ 后二者强度接近. 张冲^[22]试验研究了高温后再生混凝土的残余抗压强度及抗冻耐久性. 本文针对高温处理后的再生混凝土立方体试件, 定量研究水胶比和大掺量粉煤灰对抗压强度的影响程度, 并探讨不同因素对混

凝土强度的影响机理. 论文结果可丰富再生混凝土研究内容, 并为再生混凝土火灾后的修复及应用提供依据和参考, 该研究具有重要科学意义和应用价值.

1 试验设计

1.1 试验原材料

水泥采用陕西秦岭水泥公司生产的秦岭牌 P. O 42.5 级普通硅酸盐水泥, 其主要物理性能指标见表 1.

表 1 P. O 42.5 级普通硅酸盐水泥主要物理性能指标

Tab. 1 Physical compositions of P. O 42.5 ordinary portland cement

| 规格 | 细度/% | 标准稠度 用水量/% | 初凝时间 /min | 终凝时间 /min | 安定性 | 抗压强度/MPa | | 抗折强度/MPa | |
|-----------|------|---------------|--------------|--------------|-----|----------|------|----------|------|
| | | | | | | 3 d | 28 d | 3 d | 28 d |
| P. O 42.5 | 2.8 | 27.5 | 170 | 220 | 合格 | 24.3 | 45.8 | 6.3 | 9.6 |

粉煤灰为西安灞桥热电厂生产的粉煤灰, 烧失量为 3.65%, 其主要化学成分见表 2.

表 2 粉煤灰的主要化学成分

Tab. 2 Main chemical compositions of fly-ash

| 化学 成分 | CaO | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | SO ₃ | Na ₂ O、 K ₂ O |
|----------|------|------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-----------------|--|
| 含量/% | 4.88 | 0.83 | 31.56 | 49.02 | 6.97 | 1.2 | 1.78 |

砂: 灞河河砂, 表观密度 2 650 kg/m³, 堆积密度 1 480 kg/m³, 细度模数 2.7, 含泥量 1.5%.

天然粗骨料: 石灰质碎石, 表观密度 2 680 kg/m³, 堆积密度 1 670 kg/m³, 吸水率 0.41%, 含泥量 0.25%, 压碎指标 4.04%, 粒径分为 5~15 mm 和 15~20 mm 两种, 质量比为 3:2.

再生粗骨料: 西安市建新环保公司生产的再生骨料, 表观密度 2 458 kg/m³, 堆积密度 1 390 kg/m³, 吸水率 4.71%, 含泥量 0.41%, 压碎指标 17%, 粒粒径分为 5~15 mm 和 15~20 mm 两种, 质量比为 3:2.

水: 西安市自来水.

1.2 试验方案及配合比

试验共设计 15 种不同配合比的 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试件, 如表 3 所示. 相同配合比试件根据不同温度浇筑相应组数, 每组 3 个试件. 混凝土拌和物采用人工搅拌, 严格按照 GB/T 50080-2002《普通混凝土拌和物性能试验方法》进行, 24 h 后试件拆模, 并洒水自然养护 56 d.

表 3 混凝土配合比

Tab. 3 Mix proportions of concrete

| 编号 | 水胶比 | 取代率/% | 粉煤灰掺量/% | 水 | 水泥 | 粉煤灰 | 砂 | 天然骨料 | 再生骨料 | 附加水 |
|-----------|------|-------|---------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|------|
| C3R0F0 | 0.34 | 0 | 0 | 150 | 443 | 0 | 613 | 1 244 | 0 | 0 |
| C3R100F0 | 0.34 | 100 | 0 | 150 | 443 | 0 | 613 | 0 | 1 244 | 30 |
| C3R100F30 | 0.34 | 100 | 30 | 150 | 310.1 | 132.9 | 613 | 0 | 1 244 | 30 |
| C3R100F50 | 0.34 | 100 | 50 | 150 | 221.5 | 221.5 | 613 | 0 | 1 244 | 30 |
| C4R0F0 | 0.4 | 0 | 0 | 165 | 412.5 | 0 | 620 | 1 203 | 0 | 0 |
| C4R0F30 | 0.4 | 0 | 30 | 165 | 288 | 124 | 620 | 1 203 | 0 | 0 |
| C4R0F50 | 0.4 | 0 | 50 | 165 | 206 | 206 | 620 | 1 203 | 0 | 0 |
| C4R50F0 | 0.4 | 50 | 0 | 165 | 412.5 | 0 | 620 | 601.5 | 601.5 | 16.5 |
| C4R100F0 | 0.4 | 100 | 0 | 165 | 412.5 | 0 | 620 | 0 | 1 203 | 33 |
| C4R100F30 | 0.4 | 100 | 30 | 165 | 288 | 124 | 620 | 0 | 1 203 | 33 |
| C4R100F50 | 0.4 | 100 | 50 | 165 | 206 | 206 | 620 | 0 | 1 203 | 33 |
| C5R0F0 | 0.5 | 0 | 0 | 185 | 370 | 0 | 646 | 1 200 | 0 | 0 |
| C5R100F0 | 0.5 | 100 | 0 | 185 | 370 | 0 | 646 | 0 | 1 200 | 37 |
| C5R100F30 | 0.5 | 100 | 30 | 185 | 259 | 111 | 646 | 0 | 1 200 | 37 |
| C5R100F50 | 0.5 | 100 | 50 | 185 | 185 | 185 | 646 | 0 | 1 200 | 37 |

注: 再生骨料取代率、粉煤灰掺量均为质量百分数. C 后的数字表示水胶比, R 后的数字表示再生骨料取代率, F 后的数字表示粉煤灰掺量, T 后的数字表示温度. 例如: C4R100F30T400 表示水胶比为 0.4, 再生骨料取代率为 100%, 粉煤灰掺量为 30%, 经 400 ℃ 高温作用的混凝土试件. 以下同.

1.3 加热和加载设备及方法

本次试验加热设备为洛阳华旭利尔电炉公司生产的 JHRT2-45-9 型台车式高温电阻炉(见图 1), 炉膛尺寸为 1 500 mm×450 mm×600 mm, 最高使用温度 1 000 ℃, 温度由配套的控制柜控制. 试验的升温速率为 5 ℃/min, 达到目标温度后恒温 3 h. 恒温结束后将试件取出, 置于室内自然冷却至室温.



图 1 台车式高温电阻炉

Fig. 1 Car-type resistance furnace of high temperature experiment

本次加载设备使用无锡新路达设备公司生产的 TYA-2000 型电液式压力试验机(见图 2), 最大加载 2 000 kN, 静压试验严格按照 GB/T 50081-2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行. 为避免试件吸收空气中的水分导致其抗压强度发生变化, 高温处理后的混凝土试件冷却至室温后立

即进行静压试验^[23].



图 2 电液式压力试验机

Fig. 2 Electric hydraulic pressure testing machine

2 试验结果及分析

2.1 高温试验现象和数据

当试件加热至 130 ℃时, 可以闻到微弱的气味, 150 ℃时炉口出现少许水蒸气, 200 ℃时有大量水蒸气冒出, 同时伴有刺鼻气味, 330 ℃以后水蒸气开始减少, 至 360 ℃时基本看不到水蒸气冒出. 经 200 ℃高温处理后的试件与常温试件颜色差别不大, 为青灰色; 对于 400 ℃试件, 为略微灰褐色, 且试件表面出现少许肉眼可见的细小裂缝, 质地变轻脆; 对于 600 ℃试件, 颜色泛黄且裂缝变宽; 800 ℃试件为淡黄色, 质地疏松, 须小心搬运以免磕碰损坏.

经高温作用后, 不同配合比混凝土试件的抗压强度如表 4 所示. 表中数据均为 3 个混凝土试件强度的平均值.

表 4 高温后混凝土的抗压强度

Tab. 4 Compressive strength of concrete after high temperature MPa

| 编号 | 20 | 200 | 400 | 600 | 800 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|------|
| C3R0F0Txx | 58.48 | — | 42.54 | — | — |
| C3R100F0Txx | 44.76 | — | 32.17 | — | — |
| C3R100F30Txx | 34.68 | — | 33.39 | — | — |
| C3R100F50Txx | 25.91 | — | 28.16 | — | — |
| C4R0F0Txx | 54.46 | 49.97 | 38.71 | 23.15 | 7.82 |
| C4R0F30Txx | 42.82 | — | 28.48 | — | — |
| C4R0F50Txx | 35.55 | — | 25.06 | — | — |
| C4R50F0Txx | 42.79 | 43.63 | 34.89 | 18.91 | 6.82 |
| C4R100F0Txx | 47.02 | 47.19 | 33.56 | 16.56 | 8.09 |
| C4R100F30Txx | 31.87 | — | 28.73 | — | — |
| C4R100F50Txx | 22.70 | — | 25.63 | — | — |
| C5R0F0Txx | 41.93 | — | 32.08 | — | — |
| C5R100F0Txx | 37.46 | — | 30.90 | — | — |
| C5R100F30Txx | 23.51 | — | 22.92 | — | — |
| C5R100F50Txx | 20.95 | — | 21.58 | — | — |

注: 编号中的 Txx 表示不同温度, Cxx 表示不同水胶比, Rxx 表示不同再生骨料取代率, Fxx 表示不同粉煤灰掺量. 以下同.

2.2 温度的影响

水灰比为 0.4, 不掺粉煤灰、不同再生骨料取代率的混凝土试件经历不同温度后的抗压强度如图 3 所示. 结果表明: 混凝土经 200 °C 高温处理后的抗压强度与常温时基本相当, 温度超过 400 °C 后, 3 种配合比混凝土的强度几乎呈直线下降且降幅较大, 800 °C 时试件残余抗压强度已不足常温强度的 20%; 温度不超过 600 °C 时普通混凝土强度均高于再生混凝土, 800 °C 时 3 种配合比混凝土的抗压强度相差不大. 对于普通混凝土, 抗压强度随着温度升高而逐渐降低; 对于再生混凝土, 200 °C 时抗压强度略有升高, 400 °C 时强度下降, 800 °C 时与普通混凝土强度基本一致.

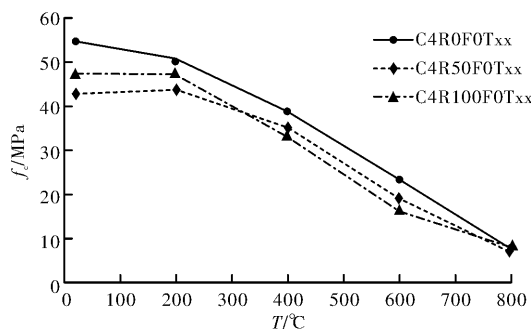


图 3 温度与抗压强度的关系曲线

Fig. 3 Variation of compressive strength with exposure temperature

2.3 水胶比的影响

如图 4 所示, 常温下不同水胶比的普通混凝土, 其抗压强度随着水胶比的增大而减小, 几乎呈线性变化, 这与 Hwang K 等^[24]的研究结果相吻合. 水胶比为 0.34 时普通混凝土强度最高, 达到了 58.48 MPa, 水胶比为 0.4 和 0.5 时的强度依次降低; 不同水胶比的再生混凝土, 其抗压强度均较普通混凝土低, 其中水胶比为 0.4 时混凝土强度最高, 为 47.02 MPa, 水胶比为 0.34 时强度次之, 水胶比为 0.5 时强度最低. 由再生混凝土常温及高温时的强度变化规律可知, 造成这种现象的原因并非高温作用. 其可能原因: (1) 再生骨料表面吸附较多粉尘, 含泥量增高对界面过渡区的力学性能影响较大, 进而降低抗压强度; (2) 再生骨料表面的大量微裂缝, 导致比表面积增大, 虽然添加了附加水, 但在小水胶比 (0.34) 条件下水泥浆的流动性不足, 水泥浆与再生骨料的结合性能较差, 无法形成有效结合面, 造成强度偏低.

经 400 °C 高温作用后, 普通混凝土与再生混凝土均出现了强度损失, 如表 5 所示. 普通混凝土试件经高温作用后, 水胶比 0.34 时强度最高, 为

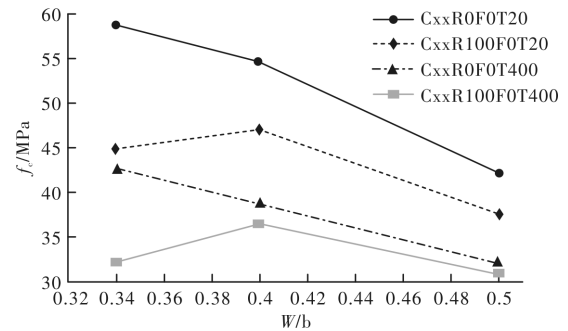


图 4 水胶比与抗压强度的关系曲线

Fig. 4 Variation of compressive strength with water-binder ratio

42.54 MPa, 水胶比为 0.4 时次之, 水胶比为 0.5 时的强度最低. 由表 5 可知, 3 组水胶比混凝土高温后的强度损失率分别为 27.25%, 28.92%, 23.49%. 再生混凝土试件经高温作用后, 其强度变化规律与常温试件一致, 水胶比 0.4 时强度最高, 为 33.56 MPa, 水胶比为 0.4 时次之, 水胶比为 0.5 时的强度最低, 3 组试件的强度损失率分别为 28.13%, 22.25%, 17.51%. 高温后混凝土抗压强度降低的可能原因: (1) 经 400 °C 高温作用后, 试件中 C-S-H 凝胶脱水, 造成水泥浆体与粗骨料间粘结力下降; (2) 水泥浆胶体与粗骨料升温膨胀, 但由于膨胀系数不同出现变形差, 导致二者接触面产生微小裂缝. 另外, 对于普通混凝土和再生混凝土, 水胶比为 0.5 时的抗压强度损失率均小于其它两组. 其可能原因: 低水胶比下混凝土的密实度更高, 从而具有更低的孔隙率和渗透性, 高温时混凝土中的水分蒸发导致水泥浆压力增大, 而低水胶比混凝土的低渗透率限制了水蒸气的扩散, 当孔隙压力超过混凝土抗拉强度时将产生微裂缝, 进而导致混凝土强度降低.

表 5 高温后混凝土的抗压强度损失率

Tab. 5 Loss ratio of compressive strength of concrete after high temperature

| 水胶比 | 0.34 | 0.4 | 0.5 |
|-------|--------|--------|--------|
| 普通混凝土 | 27.25% | 28.92% | 23.49% |
| 再生混凝土 | 28.13% | 22.25% | 17.51% |

2.4 粉煤灰的影响

常温下不同粉煤灰掺量的普通混凝土和再生混凝土, 其抗压强度均随粉煤灰掺量的增加而减小, 如图 5 所示. 对于普通混凝土, 粉煤灰掺量为 0%、30%、50% 时的抗压强度分别为 54.46 MPa、42.82 MPa、35.55 MPa; 对于再生混凝土, 其抗压强度均较普通混凝土低, 分别为 47.02 MPa、

31.82 MPa、22.70 MPa。虽然粉煤灰的“火山灰效应”有利于提高混凝土强度,但由于大掺量粉煤灰取代水泥后,水泥的水化产物相对减少,而粉煤灰早期水化较慢,未能有效弥补减少的水泥水化产物,造成界面联结薄弱,导致混凝土强度不足。

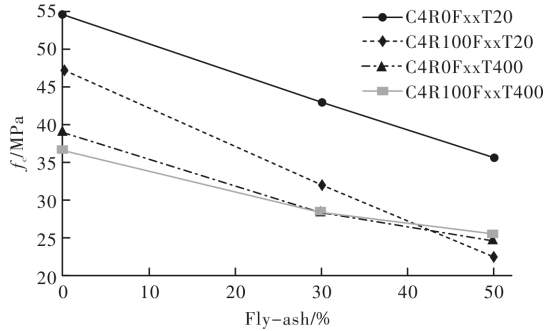


图 5 粉煤灰掺量与抗压强度的关系曲线
Fig. 5 Variation of compressive strength with the content of fly-ash

经 400 °C 高温作用后,普通混凝土和再生混凝土均出现了强度损失,如表 6 所示。未掺粉煤灰的混凝土强度下降最多,普通混凝土和再生混凝土的强度损失率分别为 38.04% 和 22.25%;掺量为 30% 和 50% 时的混凝土试件,其强度损失率均小于未掺粉煤灰的试件。对于再生混凝土,这一现象更加明显,粉煤灰掺量为 30% 时强度损失率为 9.85%,粉煤灰掺量为 50% 时高温后强度甚至超过常温时的强度。

表 6 高温后混凝土的抗压强度损失率

Tab. 6 Loss ratio of compressive strength of concrete after high temperature

| 粉煤灰掺量 | 0% | 30% | 50% |
|-------|--------|--------|--------|
| 普通混凝土 | 38.04% | 33.49% | 29.50% |
| 再生混凝土 | 22.25% | 9.85% | -12.9% |

2.5 水胶比和粉煤灰的影响

不同温度下,水胶比和粉煤灰掺量对再生混凝土抗压强度的影响如图 6 所示。未掺粉煤灰的再生混凝土,抗压强度随着水胶比的增大而先增后减;粉煤灰掺量为 30% 和 50% 的再生混凝土试件,抗压强度均随水胶比的增大而减小。粉煤灰的微集料效应具有改善水泥水化环境、提高混凝土均匀性等特点,粉煤灰的加入弥补了低水胶比下水泥浆与再生骨料结合面不良的缺陷,其抗压强度变化趋势与普通混凝土一致。

经 400 °C 高温作用后,3 种粉煤灰掺量的再生混凝土试件在不同水胶比下的抗压强度损失率如表 7 所示。未掺粉煤灰的再生混凝土试件,其强度

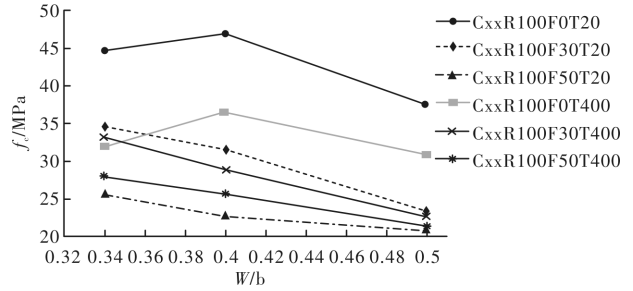


图 6 水胶比和粉煤灰与抗压强度的关系曲线
Fig. 6 Variation of compressive strength with water-binder ratio and fly-ash

损失随水胶比的增大而减小,分别为 28.13%、22.25%、17.51%,粉煤灰掺量为 30% 时强度损失率大幅降低,粉煤灰掺量为 50% 时高温后的强度超过常温时的强度。其可能原因:(1)高温作用对混凝土造成损伤,导致抗压强度降低;(2)掺加粉煤灰的混凝土试件中残留大量未水化的 SiO_2 和 Al_2O_3 ,在高温过程中这两种物质将与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,生成新的水化硅酸钙和水化铝酸钙凝胶,这有助于提高混凝土强度。

表 7 高温后混凝土的抗压强度损失率

Tab. 7 Loss ratio of compressive strength of concrete after high temperature

| 水胶比 | 0.34 | 0.4 | 0.5 |
|------------|--------|---------|--------|
| CxxR100F0 | 28.13% | 22.25% | 17.51% |
| CxxR100F30 | 3.72% | 9.85% | 2.51% |
| CxxR100F50 | -8.68% | -12.91% | -3.00% |

3 结论

(1)对于普通混凝土,抗压强度随着温度升高而逐渐降低;对于再生混凝土,200 °C 时抗压强度略有升高,400 °C 时强度下降,800 °C 时与普通混凝土强度基本一致;经高温作用后,普通混凝土的强度损失率通常较再生混凝土大。

(2)常温下不同水胶比的普通混凝土,其抗压强度均随水胶比的增大而减小,几乎呈线性变化;不同水胶比的再生混凝土,其抗压强度均较普通混凝土低,其中水胶比为 0.4 时混凝土强度最高,水胶比为 0.34 时次之,水胶比为 0.5 时最低;高温时的强度损失率,低水胶比时较高水胶比时大。

(3)常温下不同粉煤灰掺量的普通混凝土和再生混凝土,其抗压强度均随粉煤灰掺量的增加而减小;高温作用后,30% 粉煤灰掺量再生混凝土的强度损失率低于未掺粉煤灰试件,50% 粉煤灰掺量再生混凝土强度超过常温时的强度;粉煤灰

的二次水化作用可以有效弥补再生混凝土因高温作用引起的强度损失。

参考文献 References

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [2] 白国良, 张锋剑, 安昱峰, 等. 再生混凝土承重砌块试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, 43(1): 7-12.
BAI Guoliang, ZHANG Fengjian, AN Yuyi, et al. The research of recycled bearing concrete hollow blocks [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2011, 43(1): 7-12.
- [3] 薛建阳, 戚亮杰, 罗峥, 等. 型钢再生混凝土框架一填充墙结构抗震性能水平和容许变形值研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(1): 15-20.
XUE Jianyang, QI Liangjie, LUO Zheng, et al. Study on seismic performance levels and allowable deformation values of steel reinforced recycled concrete frame structure with infilled wall [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(1): 15-20.
- [4] 孔德玉. 天然与再生骨料混凝土水灰比统一规定(I)—粗骨料强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(2): 129-134.
KONG Deyu. Unified bolomey's formula of concrete made with natural and recycled coarse aggregate(I)—effect of strength of coarse aggregate[J]. Journal of Building Material, 2003, 6(2): 129-134.
- [5] 肖建庄, 李佳彬, 孙振平, 等. 再生混凝土的抗压强度研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(12): 1558-1561.
XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, SUN Zhenping, et al. Study on compressive strength of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2004, 32(12): 1558-1561.
- [6] KUTALMIS Recep Akça, ÖGÜR Çakır, et al. Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 620-630.
- [7] KOU S C, POON C S. Longterm mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 37: 12-19.
- [8] 陈爱玖, 王静, 杨粉. 纤维再生混凝土力学性能试验及破坏分析[J]. 建筑材料学报, 2013, 2: 244-248.
CHEN Aijiu, WANG Jing, YANG Fen. Mechanical properties experiments and failure analysis of fiber recycled concrete [J]. Journal of Building Material, 2013, 2: 244-248.
- [9] 石建光, 许岳周. 骨料级配对再生混凝土强度和工作性能影响的试验研究和计算分析[J]. 混凝土, 2008, 1: 82-86.
SHI Jianguang, XU Yuezhou. Experiment research and analysis of aggregate gradation on the strength and workability of recycled concrete[J]. Concrete, 2008, 1: 82-86.
- [10] ETXEBERRIA M, VAZQUEZ E, MARI A. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37: 735-742.
- [11] PEDRO D, BRITO J, EVANGELISTA L. Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 71: 141-151.
- [12] DUAN Z H, POON C S. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars [J]. Materials and Design, 2014, 58: 19-29.
- [13] 肖建庄, 刘琼, 李文贵. 再生混凝土微观结构和破坏机理研究[J]. 青岛理工大学学报, 2009, 30(4): 24-30.
XIAO Jianzhuang, LIU Qiong, LI Wengui, et al. On the micro- and meso-structure and failure mechanism of recycled concrete[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2009, 30(4): 24-30.
- [14] 邓旭华. 水灰比对再生混凝土强度影响的试验研究[J]. 混凝土, 2005, 2: 46-48.
DENG Xuhua. Study on effect of compressive strength of recycled aggregate concrete with water cement ratio [J]. Concrete, 2005, 2: 46-48.
- [15] 肖江帆, 史才军, 王德辉, 等. 新拌混凝土水灰比测定方法[J]. 硅酸盐学报, 2012, 11: 1576-1585.
XIAO Jiangfan, SHI Caijun, WANG Dehui, et al. Testing methods for determination of water to cement ratio of fresh concrete a short review[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2012, 11: 1576-1585.
- [16] 陈文耀, 李文伟. 三峡工程高性能大坝混凝土配合比设计技术措施[J]. 水利学报, 2000, 5: 49-53.
CHEN Wenyao, LI Wenwei. The technical measures for the mix design of the concretedam in Three Gorges Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 5: 49-53.
- [17] JOSHI R C, LOHTIA R P, SALAM M A. Some durability related properties of concretes incorporating high volumes of sub-bituminous coal fly ash [C]//3rd CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, 1994: 447-464.
- [18] 苏益声, 孟二从, 陈宗平, 等. 高温后再生混凝土三轴受压本构关系[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6): 946-952.
SU Yisheng, MENG Ercong, CHEN Zongping, et al. Constitutive relations of recycled concrete under triaxi-

- al compression after high temperature [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6): 946-952.
- [19] 徐明,王韬,陈忠范. 高温后再生混凝土单轴受压应力—应变关系试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(2): 158-164.
- XU Ming, WANG Tao, CHEN Zhongfan. Experimental research on uniaxial compressive stress-strain relationship of recycled concrete after high temperature [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(2): 158-164.
- [20] 冯超,杨海峰,宁纪源,等. 高温后再生混凝土受压强度退化及微观结构性能分析[J]. 混凝土, 2016, 4: 24-27.
- FENG Chao, YANG Haifeng, NING Jiyuan, et al. Compressive strength degradation and micro-structure characteristics of recycled concrete after high temperature [J]. Concrete, 2016, 4: 24-27.
- [21] 万夫雄,赵鹏辉,连会杰,等. 高温后再生混凝土强度与微观机理[J]. 混凝土, 2017, 1: 52-55.
- WAN Fuxiong, ZHAO Penghui, LIAN Huijie, et al. Strength of recycled concrete after high temperature and its microstructure mechanism [J]. Concrete, 2017, 1: 52-55.
- [22] 张冲. 高温后再生混凝土的残余抗压强度及抗冻耐久性试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2016.
- ZHANG Chong. Experimental research on residual compressive strength and freeze-thaw durability of recycled aggregate concrete after high temperatures [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2016.
- [23] 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. Influences of various cooling methods and standing time on residual strength of concrete after elevated temperature exposure[J]. Journal of Building Material, 2011, 14(3): 400-405.
- [24] HWANG K, NOGUCHI T, TOMOSAWA F. Prediction model of compressive strength development of fly-ash concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(12): 2269-2276.

(编辑 吴海西)

(上接第 374 页)

- [4] 王茹,孙卫新,张祥. 明清古建筑构件参数化信息模型实现技术研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(4): 479-485.
- WANG Ru, SUN Weixin, ZHANG Xiang. Research on Parameters and Assembly of Components of Ancient Official Buildings of Ming and Qing [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2013, 45(4): 479-485.
- [5] 朱磊. 中国古代早期木结构建筑信息模型-BIM-建构的实践分析[D]. 天津:天津大学, 2012.
- ZHU Lei. Practice analysis on early ancient chinese wooden structure building information modeling (BIM) [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [6] 刘昊. 基于点云的古建筑信息模型-BIM-建立研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2014.
- LIU Hao. Research on Building Ancient Architecture Information Model Based on Point Cloud [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2014.
- [7] 孙卫新. 基于 BIM 的明清古建筑构件参数化信息模型实现技术研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2013.
- SUN Weixin. Research on parameters and assembly of components of ancient official buildings of ming and qing based on BIM [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2013.
- [8] 张慎. 基于 RevitAPI 建筑消防喷头辅助建模软件开发 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2015, 7(6): 43-47.
- ZHANG Shen. Modeling of fire sprinkler in construction based on RevitAPI [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2015, 7(6): 43-47.
- [9] 薛忠华. RevitAPI 在空间网格结构参数化建模中的应用[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(1): 58-63.
- XUE Zhonghua. Application of Revit API in Parametrization Modeling of Spatial Grid Structures [J]. Computer Aided Engineering, 2013, 22(1): 58-63.
- [10] 梁思成. 梁思成全集. 第十卷[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007: 1-162.
- LIANG Sichen. Complete Collection of Liang Sicheng. Volumn 10th [M]. Beijing: China Architecture and Buiding Press, 2007: 1-162.
- [11] 钟永. 应县木塔料拱的力学性能分析研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- ZHONG Yong. Modelling the structural behavior of Dougong brackets in Yingxian wood pagoda [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [12] 张舵. 木结构古塔的动力特性分析[D]. 湖南:国防科技大学, 2002.
- ZHANG Duo. Dynamic analysis on struetural charae-teristics of aneient timber tower [D]. Hunan. National University of Defense Technology, 2002.

(编辑 吴海西)