

# 高温后不同冷却方式对混凝土力学特性的影响

郑钰涛, 李玉成, 彭晨鑫

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 针对50块尺寸为100 mm × 100 mm × 100 mm的混凝土立方体试件进行高温后不同冷却方式下力学性能试验研究,分析常温(20℃)、200、400、600、800℃这5种不同温度下自然、喷水冷却对杨氏模量、抗压强度、峰值应力等力学性能的影响,此外还探讨了高温后不同冷却方式试件的质量损失、破坏形态。研究表明:随着温度升高,两种冷却方式试件的质量损失率逐渐增大,喷水冷却试件质量损失比自然冷却试件小,纵波波速、杨氏模量和抗压强度均呈降低趋势,温度超过400℃以后,喷水冷却试件的降低幅度更大;同时随着温度的升高,应力-应变曲线的峰值应力显著降低,所对应的峰值应变明显增加,弹性阶段曲线斜率显著降低。

**关键词:** 混凝土; 高温; 冷却方式; 杨氏模量; 抗压强度; 峰值应力; 力学性能; 破坏形态

中图分类号:TV41; TU528 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2019)04-0189-06

## Effect of different cooling methods on mechanical properties of concrete after high temperature

ZHENG Yutao, LI Yucheng, PENG Chenxin

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The mechanical properties of 50 concrete cube specimens with size of 100 mm × 100 mm × 100 mm were tested under different cooling modes after high temperature. The effects of natural and spray cooling on Young's modulus, compressive strength and peak stress were analyzed at five different temperatures: normal temperature (20℃), 200℃, 400℃, 600℃ and 800℃. In addition, the mass loss and failure modes of the specimens with different cooling methods after high temperature were discussed. The results showed that with the increase of temperature, the mass loss rate of the two cooling methods increases gradually. The mass loss of the spray cooling specimen was smaller than that of the natural cooling specimen, and the longitudinal wave velocity, Young's modulus and compressive strength decreased. The spray water cooling test piece has a greater reduction when the temperature exceeds 400℃. As the temperature increases, the peak stress of the stress-strain curve decreases significantly, the corresponding peak strain increases significantly, and the slope of the elastic phase curve decreases significantly.

**Key words:** concrete; high temperature; cooling method; Young's modulus; compressive strength; peak stress; mechanical property; failure modes

## 1 研究背景

随着城市的现代化发展,伴随着建筑物的高层化以及功能的复杂化,一旦火灾发生,短时间内建筑物就能达到上千度的高温,导致建筑物混凝土结构承载能力和安全性能的降低,更对人们生命和财产造成无法估计的危害。

混凝土作为一种多向复合材料,能够影响其力

学性能的因素较多,然而大量文献只考虑了单一的温度或者是高温作用下不同材料对混凝土力学性能的影响<sup>[1-10]</sup>,而不同冷却方式对其交互影响的研究较少<sup>[11-14]</sup>。混凝土的力学性能不但和温度有直接关系,并且还与高温作用后的冷却方式有关<sup>[15]</sup>。在建筑物火灾发生后,由于消防安全系统自动喷水灭火或消防队员射水灭火,高温混凝土在淋水后加剧了混凝土结构的变形,甚至导致整体结构坍塌的事

收稿日期:2018-12-28; 修回日期:2019-03-05

基金项目:上海市软科学领域重点项目(18692106100);国家自然科学基金项目(10872133)

作者简介:郑钰涛(1994-),男,浙江仙居人,在读硕士研究生,主要研究方向为混凝土结构。

件比比皆是。因此混凝土结构在高温后(火灾)不同冷却作用下的力学性能研究是其应用于实际工程时所面临的重要课题。

本文通过高温后不同冷却方式下混凝土试块力学性能试验,分析了常温 20、200、400、600、800℃ 共 5 种不同温度下自然冷却、喷水冷却两种冷却方式对杨氏模量、抗压强度、峰值应力等力学性能的影响,此外还探讨了高温后不同冷却方式试件的质量损失、破坏形态以及纵波波速和杨氏模量与温度的关系。

## 2 试验概况

### 2.1 试验材料及配合比

试验水泥采用上海海螺水泥有限公司生产的 42.5 复合硅酸盐水泥,细骨料为表观密度 2 700 kg/m<sup>3</sup> 的中砂,颗粒级配属于级配 II 区,粗骨料为最大粒径 20 mm 的连续级配的碎石,水为自来水。本试验中基准混凝土强度等级设计为 C35,配合比见表 1。试验添加质量分数为 1% 的 YSP 萘系高效减水剂(HS-AF),形态为黄褐色粉末。

表 1 试验混凝土配合比

			kg/m <sup>3</sup>
水泥	水	砂	石
300	156	642	1302

### 2.2 试验设备

本试验升温设备采用上海尚群电子科技有限公司制造的高温箱式电阻炉(型号 SMF1900-50),炉膛尺寸(长×宽×高)为 500 mm×300 mm×300 mm,额定功率为 20 kW,最高温度可达 1 900℃,如图 1 所示。混凝土试件纵波波速和杨氏模量的测量采用 V-ME-TER III 型超声脉冲速度测试仪,试验时每个混凝土试件测量两组对立面,得到两个数据取平均值。单轴抗压试验采用最大荷载为 2000 kN 的 SANS 微型控制电液伺服压力试验机,如图 2 所示。试验机由电脑控制,自动采集数据,直至试样开裂破坏。



图 1 高温箱式电阻炉



图 2 SANS 微机控制电液伺服压力试验机

### 2.3 试验方法

本试验共制作 50 块混凝土立方体试件,尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm。所有试件采用同一配合比。在混凝土试件制作完成后将其放入恒温养护室,1 d 后脱模,然后置于标准环境养护 28 d,用烘干机去除水分,待水分蒸发完全后测量试件的初始质量、纵波波速和杨氏模量。

测量后进行高温试验。高温试验分为常温 20、200、400、600、800℃ 共 5 种温度。试验升温速率为 5℃/min,待试件达到预定温度后恒温 6 h。高温作用后试件的冷却方式分为自然冷却和喷水冷却。自然冷却即高温后于炉膛内自然冷却至室温;喷水冷却即高温后立即放入水中快速冷却 20 min 后取出。

冷却后(喷水冷却试件室内静置 2 d 使其干燥)测量试件的质量、纵波波速和杨氏模量。测量后进行混凝土试件的单轴抗压试验。采用力控制方式进行单轴抗压试验,以 0.1 kN/s 的恒定速率施加轴向荷载,直至试件破坏,试验系统自动采集并导出实验数据。

试件按照不同作用温度、不同冷却方式进行分组,分组及编号情况见表 2。其中,第 1 个数字表示高温试验作用温度,0、2、4、6、8 分别表示常温(20℃)、200、400、600、800℃ 作用;A 表示自然冷却至室温,W 表示喷水冷却;由于混凝土内部结构不均匀,试验结果离散型较大。本试验每组至少取 5 个试件作为平行试验,并且舍去离散性较大的试件数据,以减少误差。

表 2 试件分组

冷却方式	20℃	200℃	400℃	600℃	800℃
A	0-0	2A	4A	6A	8A
W	0-0	2W	4W	6W	8W

## 3 试验结果及分析

### 3.1 外观变化

高温作用后的混凝土试件如图 3 所示。上层为

水中喷水冷却试件,下层为自然冷却试件;从左至右依次为常温(20℃)、200、400、600、800℃作用后的试件。



图3 高温后不同冷却方式的混凝土试件

试件在200℃高温作用后,两种冷却方式后的试件外观基本一样。400℃作用后,两种冷却方式后的试件颜色基本相同,而在经历600℃和800℃后,两种冷却方式后的试件颜色相近,但喷水冷却试件颜色略深。在温度超过400℃后,试件表面开始出现细微裂纹,随着作用温度的增大,细微裂纹增多,且在同样温度作用下,喷水冷却试件表面出现的细微裂纹更多,也更加明显。这是因为高温作用后喷水冷却试件遇水表面温度迅速降低,试件内部和表面产生了较大的温度差所造成的温度应力所致。

### 3.2 质量损失

冷却后(喷水冷却试件干燥后)测得试件的质量,与初始质量比较,计算得到试件的质量损失率,见表3。

冷却方式	20℃	200℃	400℃	600℃	800℃
A	0	0.660	2.356	4.936	5.500
W	0	0.669	1.651	3.252	4.287

由表3可以看出,两组试件的质量都随经历温度的升高而减小,质量损失率也相应随之增大。然而喷水冷却试件的质量损失率总体比自然冷却试件要小。

### 3.3 纵波波速与杨氏模量

本文采用超声脉冲速度测试仪测出不同温度作用后两种不同冷却方式作用下的混凝土试件的纵波波速和杨氏模量,分别见图4和5。

从图4~5可以看出,随着温度升高,两种冷却方式试件的纵波波速和杨氏模量均呈降低趋势。200℃作用后,喷水冷却试件的纵波波速和杨氏模量均大于自然冷却试件。两条曲线在200和400℃之

间出现交叉。大于等于400℃作用后,喷水冷却试件的纵波波速和杨氏模量小于自然冷却试件。作用温度小于200℃时喷水冷却试件遇水生成新的水化物在一定程度上弥合了高温造成的损伤。但在作用温度较高时,喷水冷却使试件内部与表面产生较大的温度差,对试件造成了损伤,使试件出现额外的裂缝。因此在温度大于等于400℃时,喷水冷却试件的纵波波速和杨氏模量小于自然冷却试件,且两者差值在温度越高时越明显,即喷水冷却试件的纵波波速和杨氏模量在温度越高时,降幅越大。

但就整体而言,两种冷却方式所导致的影响小于温度变化的影响。在经历800℃作用后,喷水冷却和自然冷却试件的纵波波速降幅分别为39.88%和30.65%,杨氏模量的降幅分别为63.87%和51.92%,降幅相差也仅有9.23%和11.95%。作为对比,600℃作用后的喷水冷却和自然冷却试件的纵波波速降幅分别为25.47%和19.22%,与800℃比较分别相差14.41%和11.43%;而杨氏模量则分别相差19.41%和17.17%。

由图5可以看出,杨氏模量随温度的变化的曲线近似为直线,可拟合为下式:

自然冷却:

$$E^T = -0.01973T + 31.98627 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.963$$

喷水冷却:

$$E^T = -0.02607T + 33.18836 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.996$$

式中: $E^T$ 为高温作用后的杨氏模量,GPa; $T$ 为作用温度,℃,20℃ ≤  $T$  ≤ 800℃。

### 3.4 抗压强度

采用SANS微型控制电液伺服压力试验机进行单轴抗压强度试验,试验结果见图6~7。

从图6和图7可以看出,在200℃作用后,两种冷却方式的试件单轴抗压强度变化均较小,喷水冷却试件略有增长,增幅为1.99%。在200℃和400℃之间,抗压强度缓慢减小,温度达到400℃时,两种冷却方式的混凝土试件抗压强度几乎相等。在温度超过400℃后,两种冷却方式的试件的抗压强度均显著降低,而喷水冷却试件下降速率更快。温度达到800℃时喷水冷却和自然冷却试件的抗压强度分别降低了52.09%和43.57%。在温度高于400℃后,高温时混凝土内部凝胶材料脱水分解、混凝土内层间水和化学结合水散失、Ca(OH)<sub>2</sub>脱水分解、混凝土内部结构被破坏<sup>[16]</sup>,同时高温混凝土遇水冷

却,内外温度差产生了温度应力,使得混凝土试件开

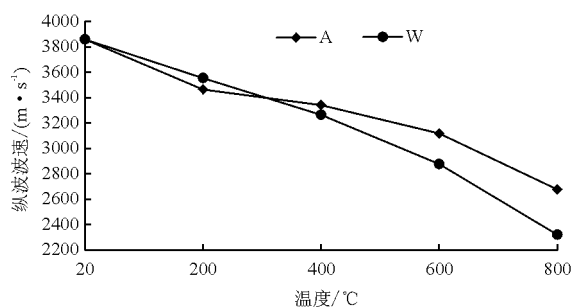


图4 纵波波速与温度的关系曲线

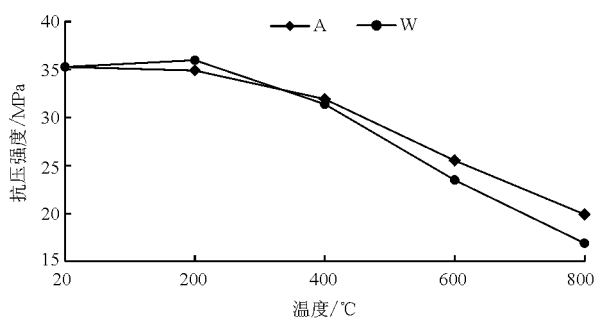


图6 单轴抗压强度和温度的关系曲线

抗压强度随温度变化的规律可用下式拟合:

自然冷却:

$$f^T = -2 \times 10^{-5} T^2 + 4.3 \times 10^{-4} T + 35.57504 \quad (3)$$

$$R^2 = 0.992$$

喷水冷却:

$$f^T = -3 \times 10^{-5} T^2 + 5.2 \times 10^{-4} T + 35.94529 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.983$$

式中: $f^T$ 为高温后的抗压强度,MPa; $T$ 为作用温度(°C), $20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C}$ 。

### 3.5 应力-应变关系

采用SANS微机控制电液伺服压力试验机进行单轴抗压试验,数据由试验机配套的数据采集系统自动采集,经整理后得到试件的应力-应变关系曲线。图8和9分别为自然冷却和喷水冷却混凝土试件的典型全应力-应变曲线。

混凝土的应力-应变曲线大致可分为3个阶段<sup>[17]</sup>:(1)压密阶段。曲线呈上凹型,混凝土内的微裂纹在外力作用下发生闭合;(2)弹性阶段。应力-应变曲线基本呈直线,在直线末端应力达到峰值;(3)应变软化阶段。应变增长较快,试件迅速破坏。

由图8和9可看出,两种冷却方式试件的应力-应变曲线呈现相似的趋势:随着作用温度的升高,曲线的峰值应力显著降低;应力峰值所对应的应变明显增加;弹性阶段曲线斜率显著降低,即弹性模量

始产生裂纹,导致其强度降低。

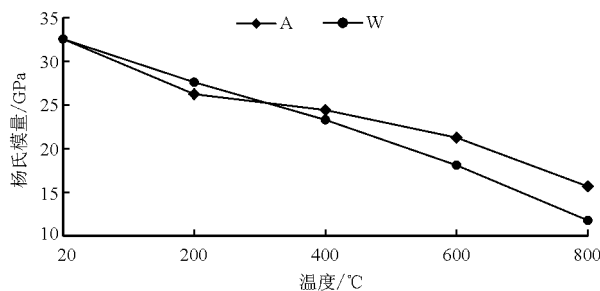


图5 杨氏模量与温度的关系曲线

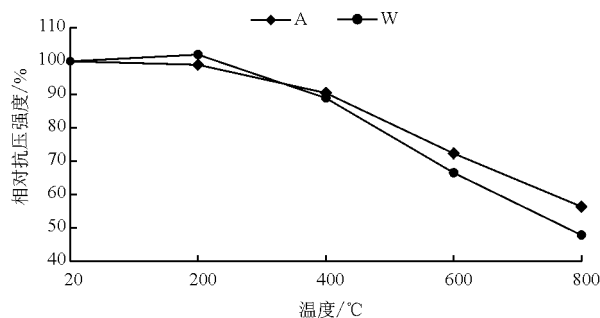


图7 相对抗压强度和温度的关系曲线

随温度的升高而明显降低。此外,200和400°C后的混凝土应力-应变曲线形状相似,为典型的脆性材料应力-应变曲线;而600和800°C后的混凝土应力-应变曲线的形状较为扁平,表明混凝土脆性降低,延性增大,应力-应变关系在弹性阶段由直线变为曲线,呈非线性变形。

图10~13分别为同一温度作用后两种冷却方式应力-应变曲线的对比。

由图10~13可以看出,经200和400°C作用后,两种冷却方式的应力-应变曲线形状相似;经600和800°C作用后,喷水冷却试件峰值应力对应的应变大于自然冷却试件。

## 4 破坏形态

对高温后不同冷却方式试件进行破坏形态分析,试件主要有3种破坏形态:柱状破坏、锥形破坏和松溃破坏,见图14和15。

从图14和15可以看出,作用温度小于400°C时,试件主要呈现柱状破坏和锥形破坏形态;在作用温度达到600°C时,试件开始出现松溃破坏形态(图14、15中省略);在作用温度达到800°C时,试件较多呈现松溃破坏形态。而对比两种冷却方式,其破坏形态没有明显差别。影响试件破坏形态的主要因素仍然是作用温度。



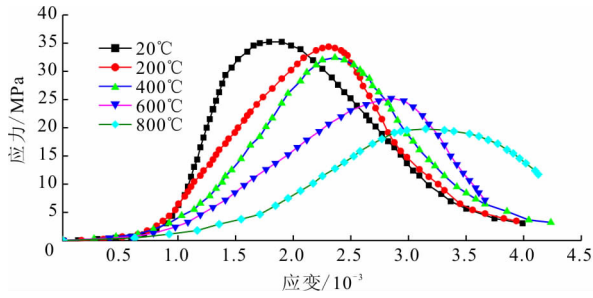


图 8 自然冷却试件应力 - 应变曲线

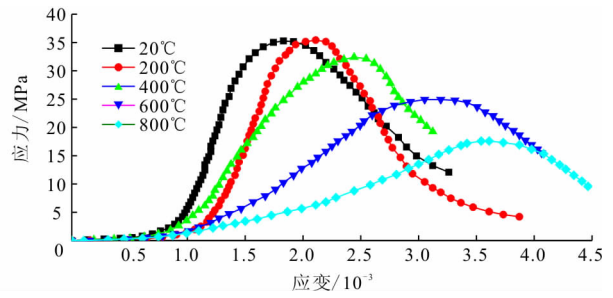


图 9 喷水冷却试件应力 - 应变曲线

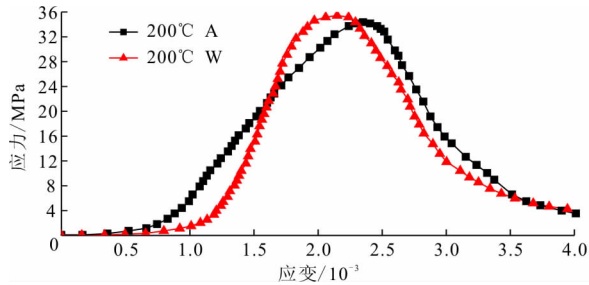


图 10 200°C 后混凝土的应力 - 应变曲线

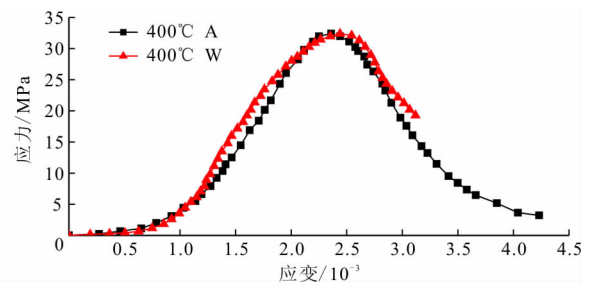


图 11 400°C 后混凝土的应力 - 应变曲线

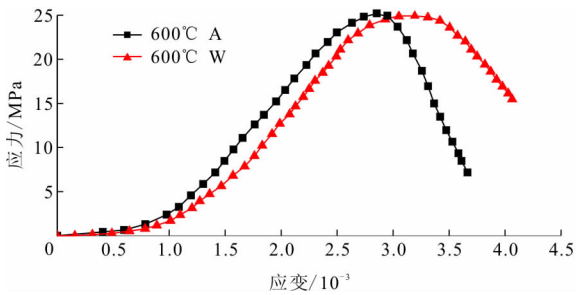


图 12 600°C 后混凝土应力 - 应变曲线

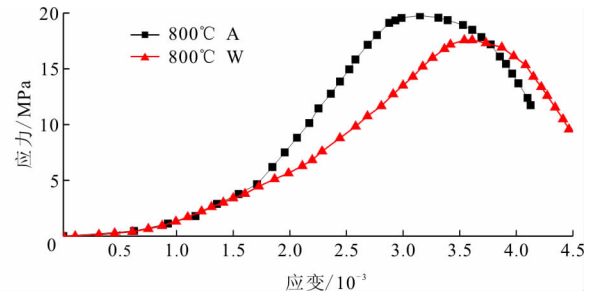


图 13 800°C 后混凝土应力 - 应变曲线



(a) 20°C (b) 200°C (c) 400°C (d) 800°C

图 14 不同温度作用后自然冷却试件典型破坏形态



(a) 20°C (b) 200°C (c) 400°C (d) 800°C

图 15 不同温度作用后喷水冷却试件典型破坏形态

## 5 结 论

(1) 混凝土试件在 200 和 400°C 作用后两种冷却方式的外观基本一致。在经历 600 和 800°C 作用后,喷水冷却试件颜色略深;同时试件表面开始出现细微裂纹,随着作用温度的增大,裂纹增多。在同样温度下,喷水冷却试件表面出现的裂纹更多,劣化程

度更高。

(2) 随着作用温度升高,两种冷却方式下试件的质量损失率均逐渐增大,喷水冷却方式的试件质量损失小于自然冷却方式;纵波波速、杨氏模量和抗压强度也都呈降低趋势。当作用温度小于 400°C 时,两种冷却方式的纵波波速、杨氏模量和抗压强度均比较相近;当作用温度超过 400°C 后,喷水冷却试件的降低幅度更大。但就整体而言,两种冷却方式所导致的影响小于温度变化的影响。同时,通过杨氏模量、抗压强度随温度变化的规律拟合关系式也可以看出类似的规律。

(3) 随着作用温度的升高,应力 - 应变曲线的峰值应力显著降低;所对应的峰值应变明显增加;弹性阶段曲线斜率显著减小,即弹性模量明显降低。200 和 400°C 作用后的混凝土应力 - 应变曲线形状相似,为典型的脆性材料应力 - 应变曲线;而 600 和 800°C 作用后的混凝土应力 - 应变曲线的形状较为扁平,表明混凝土脆性降低,延性增大,应力 - 应变

关系在弹性阶段由直线变为曲线,呈非线性变形。两种冷却方式的应力-应变曲线的形状相似。

#### 参考文献:

- [1] 袁少林. 混杂纤维再生混凝土高温后力学性能试验研究[D]. 锦州:辽宁工业大学, 2018.
- [2] 王统辉. 高温(火灾)作用后混凝土材料力学性能的试验研究及有限元分析[D]. 长春:吉林建筑大学, 2017.
- [3] 曹璐. 建筑火灾后混凝土的性能研究实用鉴定方法[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2016.
- [4] 杜曦, 陈有亮, 刘松明, 等. 高温后聚丙烯纤维混凝土力学性能试验研究[J]. 力学季刊, 2014, 35(2):335-340.
- [5] 尹胜华. 损伤混凝土高温后的物理力学性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
- [6] 高丹盈, 赵亮平, 陈刚. 高温中纤维纳米混凝土单轴受压应力-应变关系[J]. 土木工程学报, 2017, 50(9):46-58.
- [7] 王军峰. 火灾后混凝土性能与鉴定方法研究[D]. 上海:同济大学, 2006.
- [8] 李凌志. 火灾后混凝土材料力学性能与温度、时间的关系[D]. 上海:同济大学, 2006.
- [9] 马恺泽, 刘亮, 刘超, 等. 高强混合钢纤维混凝土的力学性能[J]. 建筑材料学, 2017, 20(2):261-265.
- [10] 刘峰, 张文杰, 何东明, 等. 橡胶粉-纤维改性高强混凝土的高温性能[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(1):124-131.
- [11] 柯晓军, 杨春辉, 苏益声, 等. 冷却方式对高温后再生混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(5):794-800.
- [12] 阎慧群, 王清远. 震后再生混凝土高温静置强度试验研究及微观分析[C]//四川省力学学会学术大会, 2010.
- [13] 朱振东. 冷却制度对高温后混凝土及纤维混凝土性能影响的研究[D]. 扬州:扬州大学, 2018.
- [14] 李欣聪. 低温处理对高温后再生混凝土力学性能影响的试验研究[D]. 锦州:辽宁工业大学, 2016.
- [15] 王峥. 混凝土高温后力学性能的试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010.
- [16] 任纬航. 不同冷却制度下混凝土高温损伤机理的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
- [17] 邵伟, 陈有亮, 周有成. 不同温度及不同加热时间作用后混凝土力学性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(2):248-252.

## 喜 讯

《水资源与水工程学报》被中国科学引文数据库(Chinese Science Citation Database, 简称 CSCD)收录为 2019-2020 年度来源期刊(核心库);2008-2019 年连续 12 年被中国科学技术信息研究所评为中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)。