

# Study on the influence of water content on the high temperature performance of concrete

Liang Fu<sup>1,2</sup>

1. Shudao Railway Investment Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610299, China

2. Xuzhen Railway Co., Ltd., Zhaotong, Yunnan, 657900, China

## Abstract

This article describes the high-temperature treatment of concrete with different moisture contents (0%, 3.72%, 7.44%) at 300 °C. Explored the influence of moisture content on the microstructure and mechanical properties of concrete after high temperature. Characterize the evolution of pore structure in concrete under different moisture content conditions using nuclear magnetic resonance (NMR) technology, and evaluate the compressive strength and durability of concrete after high temperature through mechanical testing. The results indicate that the moisture content significantly affects the pore distribution and crack propagation of concrete after high temperature. High moisture content concrete experiences an increase in pore pressure under high temperature, leading to more severe microstructural degradation and a decrease in mechanical properties. This study provides important evidence for understanding the influence of moisture content on the failure mechanism of concrete in high-temperature environments.

## Keywords

Moisture content; Concrete; High temperature

## 含水率对混凝土高温性能的影响研究

付梁<sup>1,2</sup>

1. 蜀道铁路投资集团有限责任公司, 中国·四川成都 610299

2. 叙镇铁路有限责任公司, 中国·云南昭通 657900

## 摘要

本文对不同含水率(0%、3.72%、7.44%)的混凝土进行300°C高温处理。探究了含水率对高温后混凝土微观结构和力学性能的影响。通过核磁共振(NMR)技术表征不同含水率条件下混凝土的孔隙结构演变,并结合力学测试评估高温后混凝土的抗压强度和耐久性。结果表明,含水率显著影响混凝土在高温后的孔隙分布与裂纹扩展,高含水率混凝土在高温作用下孔隙压力增大,导致更严重的微观结构劣化和力学性能下降。该研究为理解含水率在高温环境下对混凝土破坏机理的影响提供了重要依据。

## 关键词

含水率; 混凝土; 高温

## 1 引言

混凝土作为一种重要的建筑材料,广泛应用于土木工程结构中。然而,随着现代工程对结构耐久性和安全性要求的不断提高,混凝土在极端环境下的性能研究逐渐成为学术界和工程界关注的热点问题。尤其是在火灾、爆炸等极端高温环境下。建筑火灾不仅会造成人员伤亡和经济损失,还可能对建筑物的水泥基材料造成严重破坏<sup>[1]</sup>。混凝土材料的劣化行为对结构安全性产生重要影响。因火灾损坏的混凝土结构修复和加固需要大量的人力和资源。在严重的情况下,由建筑火灾引起的混凝土结构的持续倒塌,会导致许多人丧

生。因此,研究混凝土在高温作用下的性能变化规律具有重要的理论意义和工程应用价值。

从另一个角度来看,混凝土是一种由不同相组成的多孔水泥基材料。水通过孔隙和裂缝渗透到混凝土,形成了不同的水梯度和水分量<sup>[2]</sup>。一些文献表明,混凝土的孔隙率、渗透率、收缩率、力学性能都可能受到内部含水量的影响。Wang<sup>[3]</sup>等人发现,粉煤灰混凝土的抗压强度随含水率的增加而降低。而弹性模量则随含水率的增加而增加。含水率是影响其高温力学性能和微观结构演变的关键因素之一。含水率对混凝土的高温劣化机制具有双重作用:一方面,混凝土中的水分在高温作用下会汽化并产生高压,导致材料内部裂纹扩展,削弱其力学性能;另一方面,水分的蒸发及随后的冷却过程对混凝土的孔隙结构和抗压强度产生复杂的影响。因此,深入探讨含水率对混凝土高温性能的作用机理,对于

【作者简介】付梁,男,中国四川眉山人,博士,工程师,从事岩土工程研究。

理解混凝土在高温环境下的劣化机制和优化混凝土配合比设计具有重要意义。

本文通过系统研究不同含水率条件下混凝土在高温作用下的微观变化和力学性能，为混凝土在高温环境下的安全性评估提供理论依据。

## 2 试验方法

### 2.1 试验材料

本文选用阿尔博特兰（安庆）有限公司生产的普通硅酸盐水泥。厦门艾斯欧标准砂有限公司生产的中国 ISO 标准砂；粗骨料采用粒径为 1.25—5mm 的均匀级配河砂；拌和水采用纯净水。混凝土的水灰比为 0.4，混凝土的配合比如表 1 所示：

表 1 混凝土配合比 (kg/m<sup>3</sup>)

材料	水	水泥	标准砂	粗骨料
配合比	225	562	850	1245

### 2.2 试验步骤

首先将水泥、骨料按比例加入搅拌机，先干拌 1-2 分钟，确保均匀混合。拌均匀后，逐步加入水，继续搅拌 3-5 分钟，直至混凝土均匀，达到所需的工作性。搅拌均匀后，将混凝土倒入模具中，一般每次浇筑约 1/3 模具高度。本文模具采用 50100mm 的圆柱体模具，在倒入混凝土前，需要清理模具并均匀图上脱模剂，确保浇筑后易于脱模。使用混凝土振动台对每层混凝土进行振捣，确保混凝土充分密实，避免出现空隙和蜂窝状结构。混凝土浇筑完毕后，使用刮板将表面抹平。

混凝土浇筑完成后，需要在空气中放置约 24 小时，待其初凝。24 小时后拆模，取出混凝土试件。将混凝土试件放入养护箱中标准养护 28 天，温度控制在 20±2℃，湿度在 95% 以上。

为了达到试样的特定水分含量，混凝土试样在特殊条件下进行固化。混凝土在 105℃ 的烘箱中干燥，然后将一些样品浸泡在水中直到饱和。在干燥或浸泡过程中，使用电子平衡器来记录样品的质量。当连续两次测量的试样质量误差在 ±1‰ 以内时，认为试样完全干燥或饱和。在完全干燥和完全饱和条件下，固化试样的初始含水量分别为 0% 和 7.44%。

本文选择 3 种含水率（0%、3.72%、7.44%）的混凝土进行高温试验。当火灾温度高于 300℃ 时，混凝土中游离水几乎完全蒸发。因此，高温膨胀试验的最高目标温度为 300℃。使用马弗炉将试样从环境温度以 10℃/min 的速率加热到 300℃。将样品在特定温度下保持 120 min 后，自然冷却到环境温度。待样品冷却后进行核磁共振试验以及单轴压缩试验。

## 3 试验结果

### 3.1 T<sub>2</sub> 谱变

核磁共振是一种无损检测技术<sup>[4]</sup>，在不破坏混凝土样本的前提下研究高温后混凝土的微观结构。使用核磁共振技术研究不同含水率下混凝土高温后的孔隙结构，能够揭示水分对孔隙演变及损伤机制的影响，量化孔隙度和孔隙分布变化，评估混凝土的耐久性和抗高温性能。这种无损检测方法可以动态跟踪水分迁移与孔隙结构的相互作用，为优化混凝土的高温性能、改进材料配比和提升耐火性提供重要的实验依据和理论支持。

本文使用核磁共振 T<sub>2</sub> 谱探究不同含水率的混凝土高温后试件的孔隙结构差异。在混凝土被水饱和时，通过检测水分子在孔隙中的含量通过水分子的含量得到孔隙分布信息。T<sub>2</sub> 弛豫速率与表面弛豫速率有关，可以简化为<sup>[5-7]</sup>：

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left( \frac{S}{V} \right) = \rho_2 F_s \frac{1}{r} \quad (1)$$

其中 T<sub>2</sub> 为横向弛豫时间，(ms)；r 为横向弛豫分量对应的孔隙半径，(um)；Fs 为孔隙形状因子；ρ<sub>2</sub> 为表面弛豫强度。

图 1 为不同含水率下的 T<sub>2</sub> 谱图。从图中可以明显看到，高温处理后不同含水率的混凝土的孔隙结构有所差异。含水率越高的混凝土第一峰的峰值越低，而第二个峰的峰值越高。这表明含水率越高的混凝土的小孔隙较少，大孔隙较多。这可能是由于在高温后，含水率高的混凝土的更多小孔隙转化为了大孔隙。主要原因在于高温作用下水分的蒸发和膨胀对孔隙结构产生了显著影响。当混凝土含水率较高时，高温加热使内部水分迅速蒸发并产生大量水蒸气。这些水蒸气无法及时排出，导致混凝土内部孔隙中的蒸汽压力迅速增大。高压条件下，原本的小孔隙受到挤压和扩展，逐渐转变为大孔隙。在高温下，水蒸气的膨胀效应不仅导致孔隙压力增大，还促使微裂纹的产生和已有裂纹的扩展。随着裂纹扩展，原本分散的小孔隙彼此连接并合并，形成更大的孔隙。

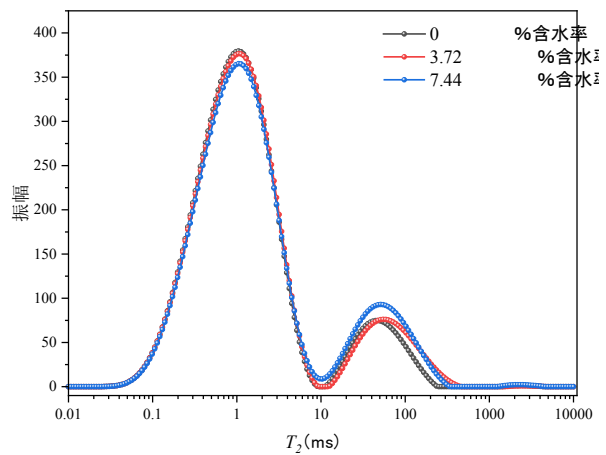


图 1 不同含水率的混凝土在高温后的 T<sub>2</sub> 谱变化

### 3.2 力学性能差异

混凝土的力学性能在高温环境下会显著下降<sup>[8,9]</sup>,含水率也会对混凝土在高温后孔隙结构和强度造成影响。通过研究含水率对高温后混凝土力学性能的影响,有助于更准确地预测火灾后建筑结构的损伤程度,提供科学依据用于火灾后结构评估和加固方案设计,提升结构防火设计的可靠性。

不同含水率的混凝土在高温后的应力应变曲线如图2所示。含水率对高温后混凝土的力学性能有影响。0%含水率的混凝土在高温后峰值强度为32.54Mpa,3.72%含水率的混凝土在高温后峰值强度为28.97Mpa,7.44%含水率的混凝土在高温后峰值强度为26.83Mpa。含水率越高的混凝土,其峰值强度越低。这说明混凝土里的水分在高温后,会加剧混凝土的劣化程度。

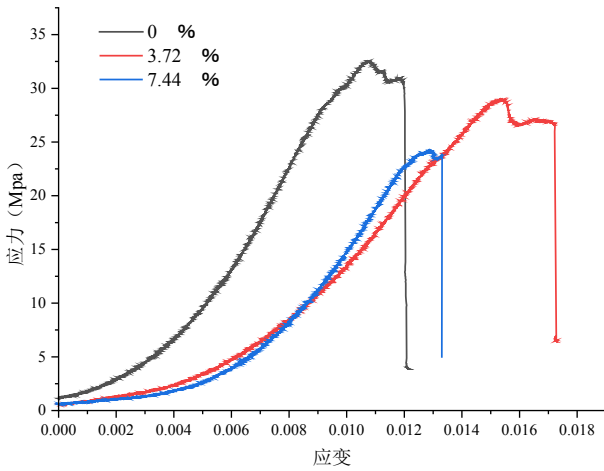


图2 不同含水率的混凝土在高温后的应力应变曲线

### 4 机理探究

在高温条件下,混凝土内部的水分迅速蒸发,尤其在含水率条件下,水分蒸发产生的大量水蒸气无法及时排出,导致混凝土内部孔隙中压力剧增。高蒸汽压力不仅使现有孔隙扩展,还可能促使微裂纹的产生和扩展,进一步劣化混凝土的微观结构。这种内压力的快速上升破坏了混凝土的内部粘结力,导致抗压强度显著下降。水分在高温下的汽化膨胀作用使得原本的小孔隙被挤压和合并,导致孔隙结构从小孔隙向大孔隙转变。高含水率下这一现象更加明显,因为更多的水分蒸发导致更多孔隙间的连通和合并。大孔隙的增多减少了混凝土的密实度,削弱了其抗压强度。

含水率较高的混凝土在高温后孔隙结构劣化严重、抗压强度降低的机理,主要源于水分的蒸发和膨胀导致的孔隙压力增大、裂纹扩展以及化学反应的影响。这些因素共同作用,导致混凝土微观结构的劣化,从而表现出强度下降。

### 5 工程意义

含水率对混凝土在高温下的力学性能和孔隙演变影响显著,研究该问题可以为建筑结构的防火设计提供指导。通

过明确不同含水率对高温后混凝土性能的影响规律,可以在设计中优化混凝土的含水控制,合理选择材料配比,提升混凝土结构的防火性能,提高建筑物在高温环境中的安全性和耐久性。含水率对混凝土在高温下的力学性能和孔隙演变影响显著,研究该问题可以为建筑结构的防火设计提供指导。通过明确不同含水率对高温后混凝土性能的影响规律,可以在设计中优化混凝土的含水控制,合理选择材料配比,提升混凝土结构的防火性能,提高建筑物在高温环境中的安全性和耐久性。在常规工程中,混凝土的含水率对其抗裂性、抗渗性和耐久性具有显著影响。通过研究含水率在高温下对混凝土性能的作用,可以为混凝土在不同环境条件下的施工质量控制提供参考依据。例如,在炎热地区或高温施工环境下,通过控制含水率,合理调配混凝土,可以减少高温劣化对工程结构的影响,提升整体耐久性。

### 6 结论

本文通过对不同含水率的混凝土进行高温处理后,进行核磁共振试验和单轴压缩试验得到如下结论:

含水率的差异会影响高温后混凝土的微观孔隙变化。在高温后,含水率高的混凝土的更多小孔隙转化为了大孔隙。含水率高的混凝土的孔隙结构的劣化越严重。

含水率会对高温后混凝土的力学性能造成影响。含水率越高的混凝土,其单轴抗压峰值强度越低。

### 参考文献

- [1] 王玉爽.混凝土热-力耦合弹塑性损伤本构模型及结构高温损伤破坏分析[D].华南理工大学,2023.
- [2] Ding X, Zhang J, Wang J. Integrative modeling on selfdesiccation and moisture diffusion in concrete based on variation of water content[J]. Cem Concr Comp. 2019;97:322-40.
- [3] Wang W, Lu C, Yuan G, Zhang Y. Effects of pore water saturation on the mechanical properties of fly ash concrete. Construct Build Mater[J]. 2017;130:54-63.
- [4] 邓凯元,李红云.基于核磁共振技术的硅灰纤维浮石混凝土分形特征与强度关系分析[J].材料科学与工程学报.
- [5] Z. Jiang, G. Cai, G. Tian, X. Liu, Effect of aggregate particle size on mortar pore structure, Constr. Build. Mater. 352 (2022) 128988.
- [6] 唐进才,宁麟,张增,等.基于低场核磁共振技术水泥砂浆反复高温热损伤的研究[J].硅酸盐通报,2022,41(10):3403-3412.
- [7] 何娅兰,宁麟,李杨,等.基于核磁共振技术对水泥砂浆高温后孔隙结构及水分迁移特征的研究[J].硅酸盐通报,2023,42(07):2336-2343.
- [8] 张治国,李洪星,李明勋.高温对混凝土力学性能影响研究进展[J].建筑技术开发,2024,51(10):136-138.
- [9] Z. Jiang, G. Cai, G. Tian, X. Liu, Experimental study on mechanical properties of precast cracked concrete under different cooling methods, Constr. Build. Mater. 301 (2021) 124141.