

# 微波快速干燥法在混凝土水胶比控制中的应用研究

付 镜<sup>1</sup>, 刘家彬<sup>1</sup>, 庞超明<sup>2</sup>, 秦鸿根<sup>2</sup>

<sup>1</sup>东南大学土木工程学院, 江苏 南京

<sup>2</sup>东南大学材料科学与工程学院, 江苏省土木工程材料重点实验室, 江苏 南京

收稿日期: 2022年12月30日; 录用日期: 2023年1月20日; 发布日期: 2023年1月31日

## 摘 要

水胶比是影响混凝土强度最主要的因素, 骨料的含水率与混凝土用水量的快速测定是控制其水胶比的关键技术。本文采用微波炉作为干燥设备, 研究了试样数量、微波炉功率和干燥时间等参数对骨料含水率和混凝土用水量试验结果的影响。试验结果表明, 骨料含水率和混凝土用水量试验分别仅需要10 min和30 min。微波法速度快、精度高、操作简单。该方法用于在日常生产中测定砂石骨料含水率和混凝土用水量是可行的, 能及时调整混凝土用水量以准确地控制混凝土水胶比。

## 关键词

微波快速干燥法, 骨料含水率, 混凝土用水量, 水胶比

# Study on the Application of Rapid Drying Method Using Microwave in the Control of Water-Cement Ratio of Concrete

Jing Fu<sup>1</sup>, Jiabin Liu<sup>1</sup>, Chaoming Pang<sup>2</sup>, Honggen Qin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>Jiangsu Key Laboratory of Construction Materials, School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu

Received: Dec. 30<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 20<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

Water-cement ratio is the most important factor affecting the strength of concrete. Rapid determination of moisture content of aggregate and water consumption is the key technology to control

文章引用: 付镜, 刘家彬, 庞超明, 秦鸿根. 微波快速干燥法在混凝土水胶比控制中的应用研究[J]. 土木工程, 2023, 12(1): 41-49. DOI: 10.12677/hjce.2023.121006

the water-cement ratio. In this paper, microwave oven is used as drying equipment to study the influence of sample quantity, microwave oven power and drying time on the test results of moisture content of aggregate and concrete water consumption. The test results show that it only takes 10 min and 30 min for testing the moisture content of aggregate and concrete water consumption respectively. The microwave method is fast, accurate and easy to operate. It is feasible to use this method to determine the moisture content of sand and gravel aggregate and the water consumption of concrete in daily production, so that the water consumption and the water-cement ratio of concrete can be accurately controlled in time.

## Keywords

Microwave Rapid Drying Method, Moisture Content of Aggregate, Concrete Water Consumption, Water-Cement Ratio

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

混凝土一般由砂、石、水泥、掺和料、水和外加剂组成，是目前使用量最大、使用面最广的建筑材料，水胶比是混凝土配合比的关键参数之一，水胶比的控制对于保证混凝土质量有着重要意义。JGJ 55-2011 标准[1]规定的配合比设计方法是以干燥状态骨料为基准的，而在生产中配制混凝土时，一方面需要先测出骨料含水率，然后再从拌合水中扣除骨料中所含的水以减少水胶比的偏差；另一方面混凝土生产中由于用水量的称量不准确而需要观察其流动性，故有必要对拌合物的用水量进行跟踪检测，确保混凝土生产时的水胶比应与实验室配合比一致。JGJ 52-2006 标准[2] [7]中规定使用烘箱或火炉来测定含水率，耗工多，耗时长，而我国还没有混凝土水胶比快速检测方法标准。因此，准确而快速地进行骨料含水率和混凝土用水量的测定尤为重要。

如何准确而快速地测定新拌混凝土用水量是国内外学者长期关注的问题。1978年，Peterson等[3]利用微波炉测定新拌混凝土的含水率，能够在1 h内完成测定，此方法成功应用于4个建设项目，证明了其实用性与价值。美国国家公路与运输协会(ASSHTO)的标准 T 318-15 (2019) [4]推荐了采用微波炉测定新拌混凝土含水率的操作规程。我国学者[5] [6] [7]也有将微波法应用于新拌混凝土水胶比的测定，并取得了一定的成果。王志华[5]介绍了一种利用微波反射及透射推定新拌混凝土用水量的方法，其原理是混凝土的介电常数在很大程度上取决于内部非结合水的含量，因此根据微波脉冲的衰减，即可据以推定混凝土的含水量。然而，试验表明外加剂、水泥、粗骨料类型对该方法的精度有一定的影响。而对于利用微波加热使水分快速蒸发的方法，张景琦等[6]指出，水泥中的石膏含有约占水泥总质量1%的结晶水，可能会给结果带来一定的误差，因此需要在水胶比计算公式中将这部分扣除。郭伟等[7]通过试验证明微波法测试的混凝土水胶比与混凝土的实际水胶比之间具有良好的线性相关性，相关系数  $R > 0.95$ 。

微波法对物体的加热方式与烘箱、火炉等传统工具不同，其原理是利用微波使物体内部的水分子振幅急剧增大并产生激烈碰撞，从而使水分快速蒸发出来，这种方式有加热快、内外受热均匀的优点，可以减少烘干时间内水泥水化对含水率测定结果的影响。为此，本文研究了微波快速干燥法快速地进行骨料含水率和混凝土用水量的测定，对试样数量、微波炉功率和干燥时间等参数对骨料含水率和混凝土用水量试验结果的影响进行了研究分析，以此确定适宜的微波功率、试样质量和干燥时间等关键试验参数，

用于混凝土拌合物的水胶比的快速检验, 从而实现混凝土抗压强度的离散性控制。

## 2. 原材料与试验方法

### 2.1. 原材料

采用徐州中联水泥有限公司生产的 P·O 42.5 水泥。其性能满足《通用硅酸盐水泥》(GB175-2020)标准要求, 密度为  $3180 \text{ kg/m}^3$ , 比表面积为  $361 \text{ m}^2/\text{kg}$ , 3 d 与 28 d 抗压强度分别为 22.5 MPa 和 48.0 MPa。

细骨料为河砂, 其细度模数为 2.5, 粗骨料为 5~20 mm 连续级配的石灰岩碎石。根据《建设用砂》(GB/T14684-2011)和《建设用卵石、碎石标准》(GB/T14685-2011)测得的骨料性能列于表 1 中。

**Table 1.** Performance parameters of aggregates

**表 1.** 骨料的性能

品种	表观密度/ $\text{kg/m}^3$	堆积密度/ $\text{kg/m}^3$	空隙率/%	含泥量/%
细骨料	2610	1450	48.0	1.5
粗骨料	2730	1420	48.0	0.5

外加剂为聚羧酸高性能减水剂, 掺量为 1.0%, 减水率为 32.4%, 1 h 坍落度损失 10 mm。拌合水为自来水。

### 2.2. 试验仪器

微波炉(功率 600~800 W, 频率 2450 MHz), 微波专用耐高温烘盘, 电子天平(称量 3000 g, 感量 0.1 g)等。

### 2.3. 试验方法

#### 2.3.1. 骨料含水率试验

按标准规定取样, 并将试样缩分至约 1000 g, 拌合均匀后备用, 细骨料称取 300.0 g, 或粗骨料称取 500.0 g, 试样放入微波专用烘盘中, 称量试样和微波专用盘的总质量, 精确至 0.1 g; 然后将微波盘放入微波炉中烘 5~10 min, 直至恒重, 待冷却至室温后称出其质量, 精确至 0.1 g。称量烘干后骨料和微波盘的总质量, 砂的含水率按下式计算, 精确至 0.1%:

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1}$$

式中:

$W$ ——骨料的含水率(%);

$m_1$ ——微波专用盘质量(g);

$m_2$ ——烘前试样与专用烘盘的总质量(g);

$m_3$ ——烘干后试样与专用烘盘总质量(g)。

以两次试验结果的算术平均值作为测定值。

#### 2.3.2. 混凝土拌合物用水量试验

按标准规定取样, 对石子最大粒径不超过 31.5 mm, 取 5 L 有代表性的混凝土拌合物, 充分搅拌均匀, 称取混凝土拌合物约 1500.0 g, 精确至 0.1 g, 装入微波专用烘盘(9~11 寸的敞口浅盘)中, 放入 700~800 W 的微波炉中烘 10 min, 取出称量, 直至烘至恒重, 称量烘干混凝土和烘盘的总质量, 精确至 0.1 g; 混凝

土拌合物单位用水量按下式计算, 精确至  $1 \text{ kg/m}^3$ :

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times C_w \times \rho$$

式中:

$W$ ——新拌混凝土单位用水量( $\text{kg/m}^3$ );

$m_1$ ——微波专用烘盘质量(g);

$m_2$ ——烘干前的试样与烘盘的总质量(g);

$m_3$ ——烘干后的试样与烘盘的总质量(g);

$C_w$ ——水的修正系数;

$\rho$ ——混凝土拌合物的实测表观密度( $\text{kg/m}^3$ )。

以两次试验结果的算术平均值作为测定值。

在搅拌过程和微波炉烘干过程中, 虽然时间不长, 但是仍有少量水的损失, 为了消除这部分水引起的试验误差, 所以进行修正。按照上面的方法在实验室拌合相近配合比的混凝土, 测定单位用水量  $W_1$ 。则水的修正系数按下式计算:

$$C_w = \frac{W_0}{W_1}$$

式中:

$W_0$ ——配合比中理论单位用水量( $\text{kg/m}^3$ );

$W_1$ ——实验室测得单位用水量( $\text{kg/m}^3$ )。

### 3. 试验结果及分析

#### 3.1. 微波法测定砂的含水率

试验的目的是研究砂的取样量、所用微波功率和砂的含水率对干燥时间和干燥程度的影响, 并确定最佳微波功率及干燥时间。本次试验使用了普通含水率和高含水率的砂, 前者为雨后 24 h 内的现场砂, 后者为在水中浸泡 7 d 以上的砂。

##### 3.1.1. 不同试样数量对干燥时间的影响

本试验采用不同取样质量和高含水率的砂样, 进行对比试验, 采用微波快速干燥法测定其含水率, 试验结果如表 2 所示。

**Table 2.** Effect of sand mass on drying time

**表 2.** 砂的质量对烘干时间的影响

砂/g	功率/W	干燥程度/%				含水率/%
		3 min	5 min	7 min	10 min	
505.5	800	45.9	69.5	97.8	100	16.5
212.9	800	81.7	99.3	100	100	16.4
506.3	700	36.9	67.9	90.9	99.7	16.6
220.1	700	58.4	88.9	99.4	100	16.5

从表 2 中可以看出, 在其它条件相同的情况下, 取样量不同对含水率测试结果影响很小, 但是对测

试时间影响较明显。砂量越少，微波干燥的越快。200 g 砂比 500 g 要节省 30% 干燥时间。同时表明，含水率为 16% 的 500 g 湿砂在 10 min 内都可烘干。

### 3.1.2. 不同微波功率对干燥时间的影响

试验采用不同的微波功率(800 W, 700 W)对质量和含水率均相同(质量 500 g、含水率 5%)的砂进行了微波干燥试验，试验结果图 1 所示。

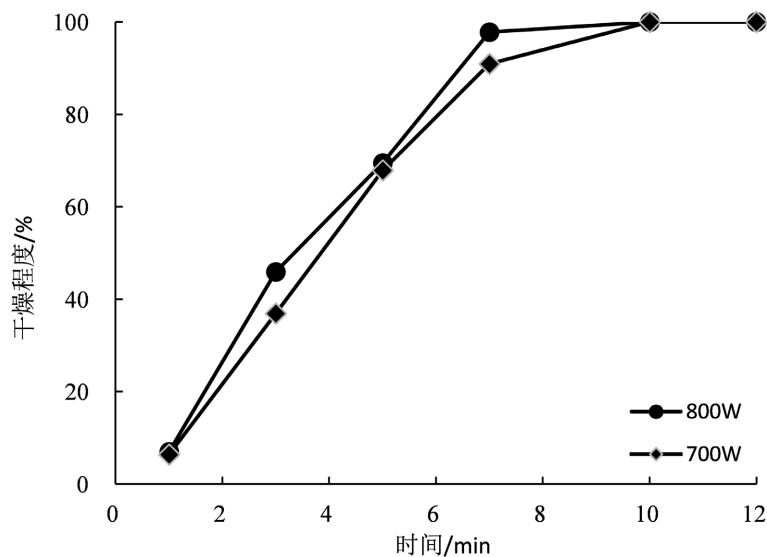


Figure 1. Effect of different microwave power on drying time  
图 1. 不同微波功率对干燥时间的影响

从图 1 中可以看出，微波功率越大，干燥速度越快，试样达恒重越快，但微波功率对测定结果影响很小。

### 3.1.3. 不同含水率对干燥时间的影响

在 700 W 和 800 W 功率下，500 g 湿砂的不同含水率对微波干燥时间的影响如图 2 所示。

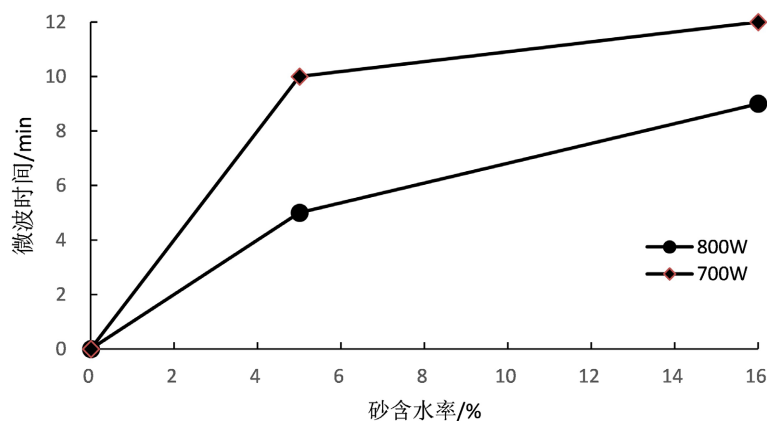


Figure 2. Sand moisture content and drying time under different microwave power  
图 2. 不同微波功率下砂含水率与干燥时间

从图 2 中可以看出，砂的含水率越高，干燥时间越长；普通含水率(5%左右)的 500 g 湿砂采用 800 W

微波 5 min 即可烘至恒重, 高含水率(16%)的 500 g 湿砂在 10 min 左右也能烘干。

### 3.2. 微波法测试石子的含水率

石子的含水率试验主要研究碎石的种类、微波炉功率和含水率对干燥时间及干燥程度的影响, 并确定最佳微波功率以及干燥时间。

#### 3.2.1. 碎石的种类对干燥时间的影响

不同种类石子的内部结构差别很大, 其类型对微波干燥有一定的影响。本文对在 7 d 以上的石灰岩和玄武岩碎石进行试验, 结果如表 3 所示。

**Table 3.** Effect of crushed stone types on its drying degree

**表 3.** 碎石种类对其干燥程度的影响

碎石种类	质量/g	干燥程度				含水率/%
		1 min	3 min	5 min	7 min	
石灰岩	1002	15.8	93.5	100	100.0	1.9
玄武岩	1003	28.6	82.5	92.9	100.0	1.2

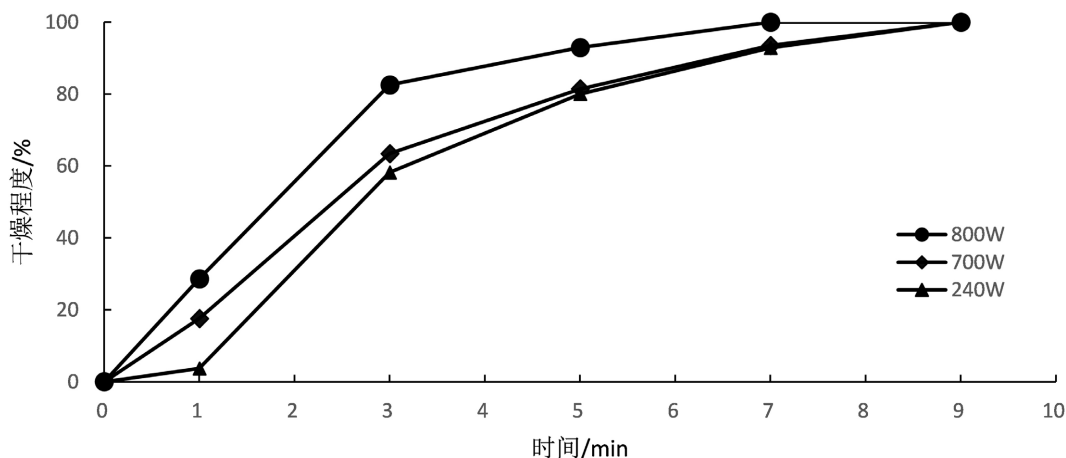
从表 3 可以看出, 玄武岩碎石在早期失水快, 这主要是因为玄武岩孔隙率低, 因此含水率较小。但后期失水较慢, 这主要是由于玄武岩的结构密实, 孔径较小, 孔径越小, 失水越难。两种 1000 g 左右的碎石都能在 7 min 内完成干燥。

#### 3.2.2. 不同功率对干燥时间和温升的影响

本文采用浸泡 7 d 以上的玄武岩碎石研究了不同微波功率对干燥时间和温升的影响的试验, 试验结果列于图 3 和图 4 中。

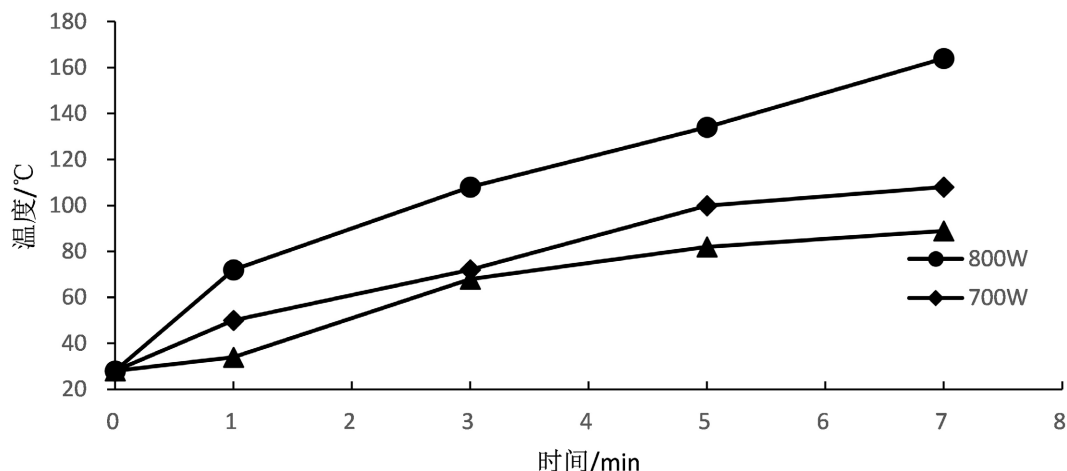
从图 3 中可以看出, 玄武岩碎石的温度随微波功率增加而明显增大, 尤其是在石子即将达到完全干燥前, 800 W 功率的微波下, 玄武岩碎石的温度远超其他功率下的温度。

从图 4 中可以看出, 随着微波功率增大, 玄武岩早期干燥程度越大, 但是后期差别不大, 主要由于后期干燥的水都是微细孔径水, 失水较难。此外, 800 W 微波下石子能在 7 min 内达到完全干燥, 而 400 W 和 240 W 微波下石子需要 9 min 才能完全干燥。



**Figure 3.** Relationship between drying degree and drying time under different power

**图 3.** 不同功率下干燥程度与干燥时间的关系



**Figure 4.** Relationship between drying degree and drying time under different power  
**图 4.** 不同功率下干燥程度与干燥时间的关系

### 3.2.3. 不同含水率对干燥时间的影响

本次试验研究了石灰岩碎石在不同含水率下的干燥时间，试验结果如表 4 所示。

**Table 4.** Effect of limestone moisture content on drying time  
**表 4.** 石灰石含水率对干燥时间的影响

碎石质量/g	含水率/%	微波功率/W	干燥时间/min
1000	1.0	800	6
1000	1.5	800	7

碎石的含水率一般不超过 1.5%。从表 4 中可以看出，当 800 W 微波功率，石子的含水率不超过 1.5% 时，其对微波干燥时间影响不大，1000 g 潮湿石子在 7 min 内能完全干燥。

### 3.3. 微波法测试混凝土拌合物用水量

混凝土拌合物的用水量试验主要研究取样量、烘盘尺寸对干燥时间及测试结果精度的影响，以及不同拌合时间对用水量测试精度的影响，其目的是确定混凝土拌合物用水量测定试验的效果最佳的取样量、烘盘尺寸以及干燥时间。本试验均采用干燥状态下的集料，其配合比如表 5 所示。

**Table 5.** Test mix proportion of concrete  
**表 5.** 混凝土试验配合比

水泥	混凝土原材料用量(kg/m <sup>3</sup> )				水灰比	砂率/%	表观密度 kg/m <sup>3</sup>
	砂	碎石	水	外加剂			
468	707	1153	154	4.43	0.33	38	2480

#### 3.3.1. 混凝土取样质量对干燥时间的影响

试验研究了采用不同的烘盘尺寸、不同拌合物的取样量，在拌制完成 10 min 后进行微波干燥所需的时间。试验结果如表 6 所示。

从表 6 中可以看出，当烘盘尺寸相同时，混凝土拌合物的取样量越多，干燥速率越慢，微波干燥时间越长；在相同取样数量时，烘盘尺寸越大，混凝土厚度减小，微波干燥时间越短，用水量测定误差



也明显减小。综合干燥程度和微波干燥时间来看, 混凝土拌合物试样适宜数量取 1500 g 为好。

**Table 6.** Effect of sampling amount of mixture on drying time  
**表 6.** 拌合料的取样量对干燥时间的影响

组别	混凝土用量/g	烘盘尺寸/寸	干燥程度				用水量误差/kg/m <sup>3</sup>
			1 min	3 min	5 min	7 min	
1	1000	8	95.7	98.1	98.9	100	0.7
2	1500	8	76.8	91.8	93.7	98.7	8.3
3	1500	9	—	—	99.4	100.1	-0.2
4	2000	9	41.4	75.7	91.9	98.2	7.3

### 3.3.2. 拌合物放置时间对用水量的影响

试验取 1500 g 混凝土拌合物试样, 在拌制完成后放置 10 min、30 min、90 min 及 120 min, 分别测定其干燥程度, 试验结果如表 7 所示。

**Table 7.** Effect of fresh concrete placing time on water consumption test  
**表 7.** 新拌混凝土放置时间对用水量测定的影响

组别	烘盘尺寸/寸	干燥程度				放置时间/min	用水量误差/kg/m <sup>3</sup>
		10 min	15 min	20 min	25 min		
1	8	61.1	95.7	99.8	101.1	10	-1.7
2	9	68.9	96.1	99.1	100.3	30	-0.5
3	9	-	96.5	99.4	100.1	90	-0.2
4	9	-	94.8	97.9	99.2	120	1.3

试验结果表明, 混凝土在拌合后的 10~120 min 范围内, 常温下由于其处于诱导期内, 所测用水量的误差均小于 $\pm 2 \text{ kg/m}^3$ , 即新拌混凝土放置时间对用水量测定误差小于 1.5%, 影响不明显。

### 3.3.3. 混凝土水胶比验证与抗压强度推定

以上的试验结果表明, 采用微波快速干燥法测试新拌混凝土用水量是可行的。与文献[4] [5]的采用振筛砂浆相比, 直接采用均匀取样的混凝土拌合料进行微波干燥具有试验速度快、砂浆损失少、测试精度高等的特点。由测试出的混凝土用水量和已知的胶凝材料用量即可计算出实际水胶比, 从而与设计的水胶比进行快速地比较和验证。

对混凝土搅拌站或施工现场, 双方都要加强混凝土配合比监测和质量控制, 特别是进行事前或事中控制, 这是非常重要的。文献[5]研究表明, 微波法测试的混凝土水胶比与混凝土 28 d 抗压强度具有良好的线性相关性, 可以建立相应的回归方程。因此, 采用微波快速干燥法测试出混凝土用水量, 计算出新拌混凝土的水胶比, 根据其线性回归方程推定出混凝土 28 d 抗压强度, 能够作为混凝土质量控制的有效手段。

## 4. 结论

本文采用微波快速干燥法研究了试样数量、微波炉功率和干燥时间等参数对砂石骨料含水率和新拌混凝土用水量试验结果的影响。得出如下结论:



1) 微波炉功率和试样品数量仅影响干燥时间, 而对骨料的含水率的测定结果影响很小; 对于 300 g 细骨料或 1000 g 粗骨料的含水率 1 次试验时间仅需要 10 min。

2) 采用微波快速干燥法测定新拌混凝土用水量, 对常温下处于诱导期的拌合物, 放置时间(在 2 h 以内)影响不明显。推荐采用功率为 700~800 W 的家用微波炉, 口径为 9~11 寸的微波专用烘盘, 均匀取样以 1500 g 左右为宜, 1 次混凝土用水量试验时间仅需要 30 min。

3) 采用微波快速干燥法测定砂石骨料的含水率和新拌混凝土用水量是可行性的, 该方法速度快、精度高、操作简单, 能够在实验室及施工现场进行快速测定, 从而及时调整用水量, 准确控制混凝土水胶比。

## 致 谢

感谢东南大学土木工程学院刘家彬老师, 东南大学材料科学与工程学院庞超明、秦鸿根老师对试验和论文写作的指导。

## 基金项目

东南大学 - 东阳市建筑科技联合研发中心科研项目“混凝土的临场与后期检测”(项目号 8505008965)。

## 参考文献

- [1] JGJ 55-2011, 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [2] JGJ 52-2006, 普通混凝土用砂石质量及检验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [3] Peterson, R.T. and Leftwich, D. (1978) Determination of Water Content of Plastic Concrete Using a Microwave Oven. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1978STIN...7921240P/abstract>
- [4] AASHTO T 318-15 (2019) Standard Method of Test for Water Content of Freshly Mixed Concrete Using Microwave Oven Drying. [https://www.techstreet.com/standards/aashto-t-318-15-2019?product\\_id=1900614#jumps](https://www.techstreet.com/standards/aashto-t-318-15-2019?product_id=1900614#jumps)
- [5] 王志华. 微波技术应用于混凝土的若干研究[J]. 混凝土及加筋混凝土, 1989(4): 2-7.
- [6] 张景琦, 杨英姿, 于亮亮. 微波法测定混凝土水灰比的试验研究[J]. 低温建筑技术, 2009, 31(2): 6-8.
- [7] 郭伟, 费洗非, 水中和. 微波法测试混凝土水胶比在预拌混凝土强度预测中应用[J]. 混凝土世界, 2019(2): 64-67.