

• 水利与土木工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202000996



微波辐射下含水率对混凝土力学性能影响

邵珠山^{1,2}, 张鹏举^{1,2}, 魏 玮^{1,2}, 陈文文^{1,2}, 张宏亮^{1,2}

(1.西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2.陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘 要:微波辅助混凝土骨料回收是一项污染少、能耗低的新型绿色技术。为探究微波辐射条件下含水率变化对混凝土加热效果及强度弱化的影响规律, 分析微波加热完成后混凝土内部骨料与砂浆的分离效果, 采用不同加热路径对混凝土试块进行加热, 获得试块的升温特性, 并利用单轴压缩试验得到不同含水率试块加热完成后的抗压强度。试验表明: 微波辐射功率和含水率是影响混凝土破碎的 2 个重要因素; 试块在含水率相对较高时, 采用高功率微波连续加热混凝土, 试块在短时低温下就会爆裂, 骨料与砂浆分离界面明显, 可以从破碎后的混凝土中剔选出较多砂浆附着率低的完整骨料。研究为微波辅助混凝土再生技术的进一步发展提供参考与借鉴。

关键词:微波辐射; 混凝土; 含水率; 加热效果; 强度弱化

中图分类号: TU528.0

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2021)06-0093-10

Influence of Moisture Content on Concrete Mechanical Properties Under Microwave Irradiation

SHAO Zhushan^{1,2}, ZHANG Pengju^{1,2}, WEI Wei^{1,2}, CHEN Wenwen^{1,2}, ZHANG Hongliang^{1,2}

(1.School of Civil Eng., Xi'an Univ. of Architecture and Technol., Xi'an 710055, China;

2.Shaanxi Key Lab. of Geotechnical and Underground Space Eng., Xi'an 710055, China)

Abstract: Microwave-assisted concrete aggregate recycling is a new green technology, with little pollution and low energy generated during the heating process. The influence of moisture content on the microwave heating effect and concrete strength weakening was explored, and the separation effect of aggregate and mortar in concrete after microwave heating was analysed. Different heating paths were utilized to heat the concrete test blocks to obtain their temperature rise characteristics, and the compressive strength of the test blocks with different moisture content after heating was obtained by conducting uniaxial compression tests. The testing results showed that microwave power and moisture content were two important factors affecting the concrete breaking. When the water content of the test block was relatively high, the test block would break under a short irradiation time and low temperature under higher microwave power input. The aggregate-mortar interface debonding occurred, which could reduce the adhesion of mortar on aggregate, and more complete aggregates with low mortar adhesion could be selected from the crushed concrete. The testing results may provide a reference for further development of microwave-assisted concrete recycling technology.

Key words: microwave irradiation; concrete; moisture content; heating effect; strength weakening

近年来,随着国家经济与技术的快速发展,以及共建“一带一路”的推进,国民生活水平日益提高,中国建筑业也保持着稳定的增长。截至2018年底,中国的总建筑面积就达到了 $601 \times 10^8 \text{ m}^2$ ^[1]。随着中国城镇化建设发展,目前,中国是世界上最大的混凝土生产国和消费国^[2],混凝土年产量比世界上其他国家

总和高出53%,此外,中国的水泥产量也是全球最高的^[3]。资源化是目前解决建筑材料需求与环境破坏之间矛盾的重要方法,将废混凝土、废砖瓦加工成再生集料,用于生产再生混凝土砌块等制品,是一种重要的资源化利用方式^[4]。研究表明,再生骨料的生产回收过程中会伴随着高能耗、大量粉尘污染等问题,且

收稿日期:2020-11-16

基金项目:国家自然科学基金面上项目(11872287);陕西省重点研发计划项目(2019ZDLGY01-10)

作者简介:邵珠山(1968—),男,教授,博士。研究方向:混凝土和岩石材料热力学。E-mail: shaozhushan@xauat.edu.cn

网络出版时间:2021-10-25 16:17:00

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20211025.1059.001.html>

生产得到的再生骨料质量不高,适应性较差^[5-8]。相比于传统的骨料回收方式,微波加热辅助混凝土骨料回收方式对环境二次污染小,机械损伤程度低,无需添加额外新材料,具有更高的安全性和自动化水平,因而是一种具有良好应用前景的再生骨料回收技术^[9-10]。

微波加热技术由于其高效、低污染及安全可控的优点,被广泛应用于食品加工、木材干燥、陶瓷加工制造及采矿等技术领域。研究表明,无论是在混凝土的养护阶段,或是废弃混凝土分离提取再生制品的资源化处理阶段,微波技术都有巨大的应用前景^[11]。肖建庄等^[12]通过低功率微波对再生粗骨料(recycled coarse aggregate, RCA)进行强化试验,与传统技术相比,微波加热改性再生粗骨料具有更理想的效果。Tsujino等^[13]首先提出了采用微波新技术进行混凝土骨料回收,并通过1 t废弃混凝土处理过程中CO₂排放量试验及力学性能测试证实,相比于传统回收方式,微波加热过程中产生的CO₂含量低且回收的RCA品质高。Ong等^[14]系统论述了微波技术在混凝土循环利用过程中的可能性,讨论了微波技术在混凝土再生应用中的基本工作原理,相比于其他传统骨料提取技术,微波加热结合机械破碎技术可以获得更高的RCA质量。然而,在土木工程领域,由于缺乏相关理论研究,微波技术尚未得到大规模的应用:一方面,混凝土作为一种复杂的人工复合材料,微波作用下混凝土的性质受配合比、含水率等因素的影响;另一方面,高温作用下混凝土内部的水分迁移变化、孔隙压力、热应力等机理研究尚不明确,极大地限制了微波技术的推广应用。

水的介电常数比一般介质材料大,因此水分对微波加热的敏感性极高,含水量越大,其介质损耗也越大^[15]。在升温过程中,混凝土内部如自由水、毛细水等会不断蒸发,水泥水化形成的水化产物,如高硫型水化硫铝酸钙(Aft)和单硫型水化硫铝酸钙(AFm)等不断脱水^[16],导致原有水化产物分解,水分蒸发和水化产物的分解使得混凝土内部孔隙增多,原有孔隙增大;当孔隙压力积聚到临界值时,混凝土发生破裂,因此含水量以及水的存在形态对微波辅助混凝土骨料回收有着重要影响。Akbarnezhad等^[17]研究表明,当砂浆内含水量增大时,砂浆吸收微波的能力随之增强。此外,煤样含水率的增大也有助于微波致裂^[18-19]。微波作用下水分对不同岩石的波速、穿透深度和强度也产生不同的影响^[20-21]。本文主要通过试验手段探究微波辐射下含水率变化对混凝土加热效果及强度弱化的影响规律,对微波辅助混凝土骨料回收技术具有重要指导意义。

1 微波加热混凝土原理

微波是一种波长介于1 mm~1 m,对应频率范围为300 MHz~300 GHz的超高频电磁波,具有波长短、频率高的特点。图1为电磁波谱图,目前工业上应用的微波主要是915和2 450 MHz 2种^[22]。混凝土作为一种以水泥为主要胶结材料,以各种矿物成分的粗细骨料为基体拌合而成的人工混合介质材料,不同程度地吸收微波能。微波加热混凝土时,微波电磁场与混凝土介质材料相互耦合,形成各种功率耗散,使微波能在混凝土内部转化为热能。从微观角度分析,混凝土内部的各种介质材料包含许多由正负电荷组成的偶极子,在微波辐射下,这些偶极子由原来的无序状态向电磁场方向排列,克服分子间相互作用,在电磁场下,偶极子反复极化,相邻极性分子间相互作用使得混凝土内部产生了剧烈的“摩擦作用”,能量由微波的电磁能转化为热能,从而导致温度不断升高^[23-25]。混凝土材料在微波场中所产生的热量大小与混凝土内部组成成分及其介电特性有关。从亚微观上来看,混凝土是一种非均质多相复合材料,水作为混凝土的一种重要的组成成分(图2),在微波辅助混凝土破碎过程中起着极其重要的作用,在受力之前,内部就由于水的多种存在状态及作用存在许多微裂纹。

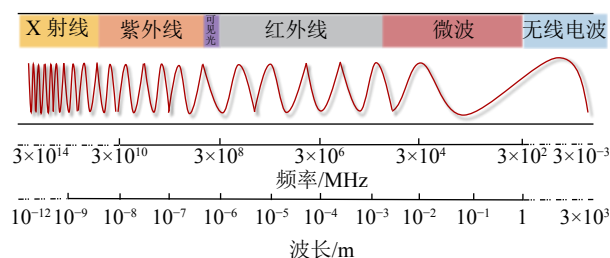


图1 电磁波谱

Fig. 1 Electromagnetic spectrum

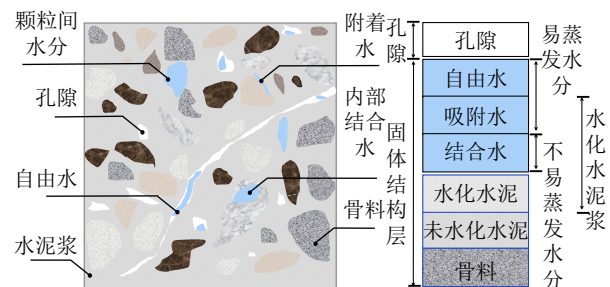


图2 混凝土亚微观组成

Fig. 2 Submicroscopic composition of concrete

微波辐射下,混凝土产生的总热量取决于混凝土内各种材料成分吸收微波的电场强度、微波频率及其介电损耗,单位体积的混凝土材料损耗的微波功率 P 为^[26-27]:

$$P = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E_0^2 \tag{1}$$
式中, f 为微波频率, ε_0 为真空介电常数 (8.85×10^{-12} F/m), ε'' 为混凝土材料介电损耗因子, E_0 为电场强度。

根据能量守恒和转化定律, 混凝土吸收的微波能会转化为热能, 对于某一介质而言, 介质损耗是基本固定的, P 与电场强度 E_0 的平方和频率 f 成正比。因此, 电场强度越大, 频率越高, 混凝土吸收的微波功率就越大, 产生的温升和热量就越大^[28]。

微波穿透深度是指电磁波穿透到介质内部的能力, 当电磁波从混凝土表面进入到混凝土内部时, 能量不断地被吸收并转化为热能, 功率和电场强度就会不断衰减, 穿透越深, 损耗于材料的能量就越多, 穿透深度用符号 D 表示^[23-29]:

$$D \approx \frac{\lambda \sqrt{\varepsilon'}}{2\pi \varepsilon''} \tag{2}$$

式中, D 为微波穿透深度, ε' 为混凝土材料介电常数, λ 为微波波长。由式(2)可知, 微波穿透深度与波长处于同一数量级, 且混凝土材料介电损耗因子越大, 微波穿透深度越低。研究表明, 微波穿透深度与混凝土微观结构能、混凝土化学成分、加热温度有关^[30-31]。

由于水的微波吸收能力大于混凝土材料, 当混凝土含水率增加时, 导致其介电特性增强, 因此, 由式(2)可知, 混凝土含水量增加后将导致微波的穿透深度降低。

混凝土吸收微波后, 微波能转化为热能, 导致混凝土的温度升高, 即:

$$Q = Cm\Delta T \tag{3}$$

式中, Q 为混凝土吸收的微波能, C 为混凝土的比热容, m 为混凝土的质量, ΔT 为混凝土吸收微波能后产生的温度增量。

2 试验设备、试样和方法

2.1 试验设备

微波加热试验采用由湖南长仪微波科技有限公司提供的CY - MU1000C - L型箱式工业级水冷微波加热系统(图3), 该系统采用微波频率为(2 450±50) MHz的多模谐振腔。多模谐振腔比单模谐振腔能够提供更加均匀的加热效果, 其结构主要包括微波加热腔、微波发生器、触摸控制系统、监控系统等。其中, 微波加热腔为尺寸420 mm×420 mm×320 mm的密闭不锈钢腔体, 微波发生器是由4个1.5 kW磁控管组成, 磁控管产生的微波能量, 由波导管传输到微波炉腔体内。温度测量采用安装在腔体内部的热电偶温度传感器, 混凝土放置在微波高温专用保温材料中央, 使热电偶与混凝土试块表面耦合, 并采用手持红外测温仪对试块进行辅助温度测量。



图 3 CY-MU1000C-L型微波加热系统
Fig. 3 CY-MU1000C-L microwave heating system

2.2 试验试样

试样采用尺寸100 mm×100 mm×100 mm, 强度等级为C35的混凝土试块。水泥为PO42.5级普通硅酸盐水泥, 粗骨料选择由微粒方解石和白云石组成的含白云质微晶灰岩, 如图4所示。微晶方解石(Cal)中分布着少量自形粒状; 白云石(Do)为单晶和聚晶; 细骨料取自中国西安渭河, 细度模量为2.6, 物理力学性能满足《混凝土用沙、石质量及试验方法标准》(JGJ52—2006)要求, 混凝土配合比如表1所示, 水泥化学成分如表2所示。拌合成的试样在温度为(20±2) °C、相对湿度为95%的标准养护条件下养护28 d, 然后, 将试块放入104~110 °C的烘箱中干燥, 直至质量不再变化, 再置于干燥器内冷却至室内常温。

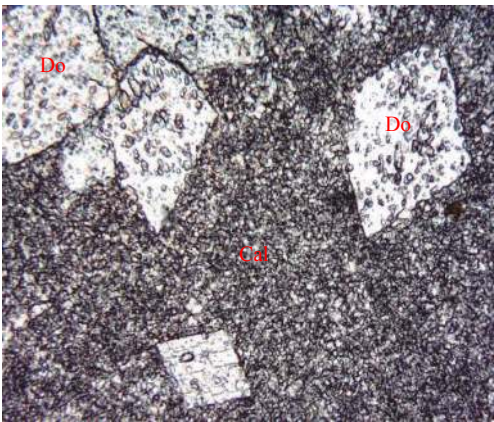


图 4 粗骨料的岩相显微图像
Fig. 4 Petrographic microscopy image of the coarse aggregates

表 1 混凝土配合比

绝对体积/(L·m ⁻³)						
水灰比/%	减水剂/(L·m ⁻³)	水	水泥	粉煤灰	细骨料	粗骨料
48	4.80	164	340	60	813	1 053

表 2 水泥化学成分

Tab. 2 Chemical compositions of cement

										%
CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	
57.57	1.21	2.01	1.35	0.43	6.45	19.50	0.25	3.08	0.34	

2.3 试验方法

取18组完全干燥的混凝土块，记录此时质量为 m_0 ，放入塑料箱中，加入蒸馏水，水面没过所有试块，并且保证试块吸水后，仍然能被淹没，每2组为同一浸泡时间，开始每隔30 min记录一下试块质量，以后依次把时间间距加大为1、2、4 h，…，即记录时间分别为0、0.5、1.5、3.5、7.5、15.5、31.5、63.5、127.5 h。

每次称重试块时，将试块从水箱中取出，放在铁架上控水5 min；然后，用湿布擦拭表面，使表面不存在水滴，但仍保持湿润状态，称重此时质量 m_i ；每次称重时都要注意轻取轻放，防止把边角碰掉，影响测量质量变化的准确性。

混凝土试块的含水率 ρ_i 为：

$$\rho_i = \frac{m_i - m_0}{m_0}$$

(4)

设置3 kW、300 s和5 kW、300 s这2种加热路径，对不同含水率混凝土试块进行微波加热试验。试块加热完成后立刻对不同加热路径下的混凝土试块进行单轴抗压强度测试，试验机加载速率设定为0.3 mm/s，以上每种试验测试均进行3次重复试验，以降低试验带来的离散性。试验流程如图5所示。

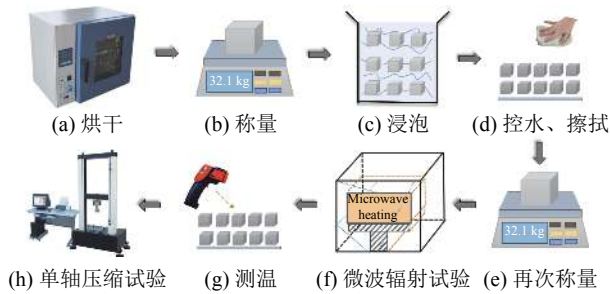


图 5 试验流程图
Fig. 5 Flow diagram of experimental



图 7 3 kW、300 s下混凝土试块在不同含水率下的加热效果

Fig. 7 Heating effect of concrete specimen at different moisture content under 3 kW and 300 s

3 试验结果

3.1 混凝土含水率

通过混凝土试块的浸泡试验，得到含水率与浸泡时间的关系(图6)。所有试块的含水率随浸泡时间的变化规律相似，在开始的3.5 h增长迅速；在127.5 h含水率就随浸泡时间增长缓慢，可以近似认为试块含水率达到饱和，此时混凝土试块的含水率为5.9%。

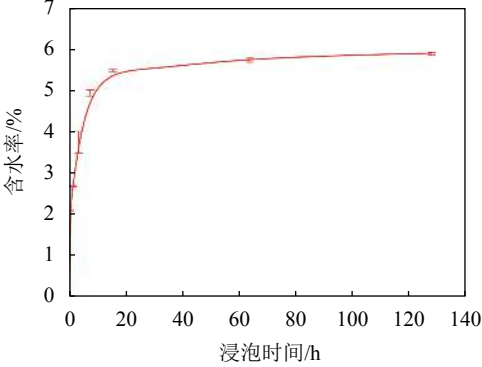


图 6 混凝土试块含水率与浸泡时间的关系

Fig. 6 Relationship between water content of concrete test block and soaking time

3.2 加热效果

当采用3 kW功率连续加热300 s时，不同含水率状态下混凝土试块加热效果如图7所示。试块完全干燥时，加热完成后混凝土表面有较为明显裂纹产生(图7(a))；随着含水率增大，加热完成后，试块表面产生的微裂纹逐渐增加(图7(b))；当试块达到饱和状态时，加热完成后，微波炉腔体内壁沾满水珠，试块表面存在少部分水分并产生较多孔隙(图7(c))。这是由于采用低功率微波加热混凝土试块时，当试块处在干燥状态，微波能量大部分作用于砂浆与骨料；当试块内部存在水分，由于水的介电常数比一般介质大，微波能量全部被混凝土试块吸收后，大部分作用于混凝土内部各种形态的水分，当水的温度达到沸点时，在内部蒸汽压力的作用下，试块开始产生裂纹。当试块达到饱和状态时，由于功率过低，试件内部水分没有被加热完毕，导致混凝土表面留有残余水分并产生较多孔隙。

当采用5 kW功率连续加热300 s时,不同含水率状态下混凝土试块加热效果如图8所示。试块完全干燥时,加热完成后混凝土表面有明显裂纹产生(图8(a));试块被浸泡后,一开始,只在混凝土表面产生微裂纹

(图8(b)、(c)),随着含水率增大,裂纹密度与深度逐渐增加(图8(f));当试块含水率相对较高时,加热过程中极易发生爆裂,能听到混凝土试块崩开弹射到微波炉内壁的声音,试块呈现不规则的碎块状。



图 8 5 kW、300 s下混凝土试块在不同含水率下的加热效果

Fig. 8 Heating effect of concrete specimen at different moisture content under 5 kW and 300 s

不同的加热路径会对不同含水率的混凝土试块产生不同的加热效果,取决于微波的加热功率及混凝土试块内部的水分含量。试验中,在5 kW的加热功率下,混凝土试块含水率达到5.74%时,混凝土试块会发生爆裂,试块达到饱和状态时(即含水率为5.90%),同组的3个试块全部发生爆裂,整个破碎过程如图9所示。破碎后混凝土碎块的骨料与砂浆分离界限明显(图10)。绝大部分破坏形式为绕晶破坏,并

可以从破碎后的混凝土中挑选出来较多完整的骨料,骨料砂浆附着率低。这是由于砂浆和骨料在微波加热过程中的介电常数、比热容、密度以及热膨胀性的差异,致使首先在砂浆-骨料界面产生温度梯度和热失配应力,导致裂纹的产生;随着含水率的增大,加热过程中迅速产生的蒸汽压力导致裂隙扩展、连接,进一步地降低砂浆-骨料界面的黏结度,最终导致砂浆和骨料界面的分离。



图 9 饱和试块在5 kW、300 s加热路径下破碎过程

Fig. 9 Crushing process of saturated sample under the heating path of 5 kW and 300 s

相比于干燥混凝土试块,微波加热饱和状态下的混凝土可以有效地去除回收骨料上附着的胶凝砂浆,作为偶极子、强极性分子,水分子介电常数比一般介质高,饱和状态下的混凝土水分含量相对较高,其介电常数、损耗因子大,吸收微波能量随之增大,

在较低的能量损耗下,使砂浆内部产生较高的温度梯度,特别是在与天然骨料界面处,致使砂浆首先发生破碎;此外,砂浆和骨料的介电性能不同,吸收微波能量也不同,导致2种介质升温速率不同,从而使砂浆与骨料的应力状态产生较大差异。

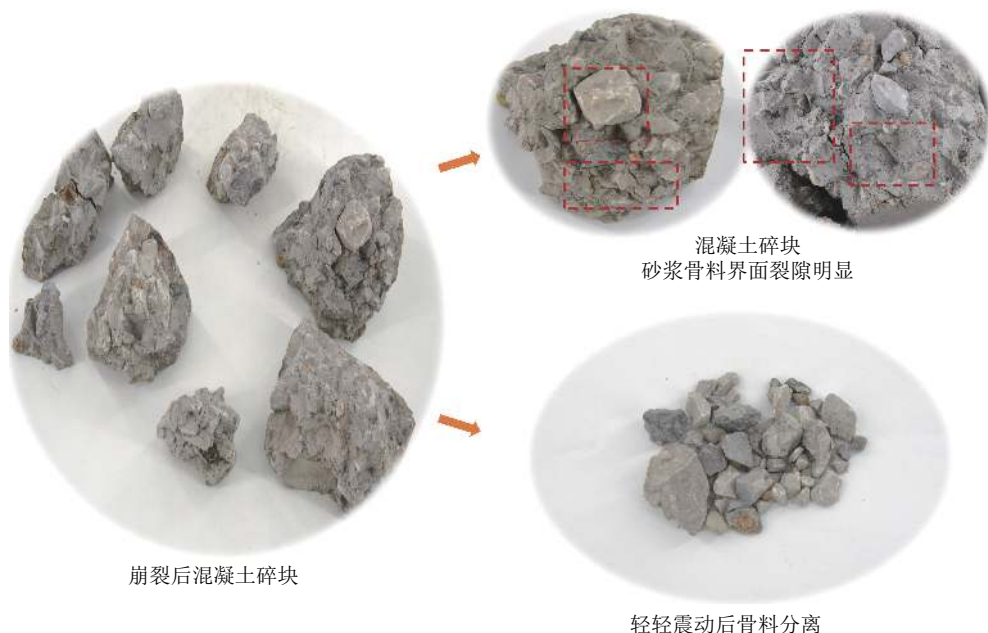


图 10 饱和试块在5 kW、300 s加热路径下破碎效果

Fig. 10 Crushing effect of saturated sample under the heating path of 5 kW and 300 s

3.3 升温特性

当采用3 kW的功率加热300 s时,混凝土试块表面温度随加热时间变化如图11所示。由图11可见,试块表面温度快速升高,与时间近似成直线关系。试样中含有水分,水作为偶极子、强极性分子,属于强吸收微波物质,可提高试样的相对介电常数。含水率越高,增长速率越慢,这是由于水分在混凝土内部的蒸散发热作用,导致温度降低。混凝土试块完全干燥时,试块的平均升温速率为0.33 °C/s;当含水率达到5.9%时,试块的平均升温速率降低到0.18 °C/s,降低45%。

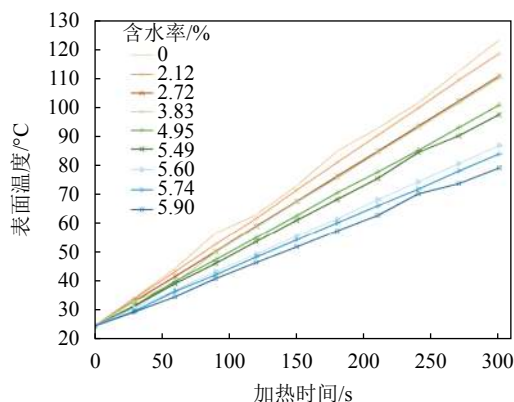


图 11 3 kW、300 s加热路径下混凝土的升温特性

Fig. 11 Heating characteristics of concrete under 3 kW, 300 s heating path

当采用5 kW的功率加热300 s时,混凝土试块表面温度随加热时间变化如图12所示。由图12可见,含水率越高,增长速率越慢。混凝土试块完全干燥时,

试块的平均升温速率为0.67 °C/s;当含水率达到5.9%时,试块的平均升温速率降低到0.51 °C/s,降低24%。当混凝土含水率相对较高时,就会发生爆裂;达到饱和状态,加热到211 s时,试块在低温下全部爆裂。

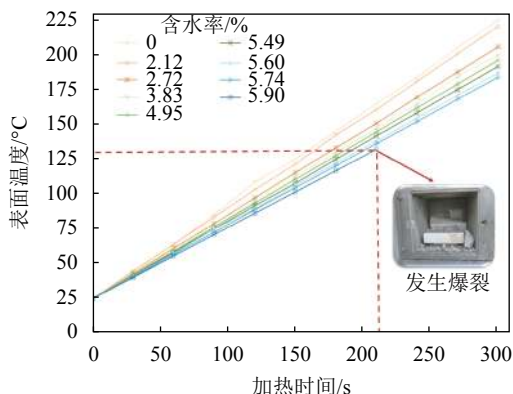


图 12 5 kW、300 s加热路径下混凝土的升温特性

Fig. 12 Heating characteristics of concrete under 5 kW, 300 s heating path

采用不同的微波功率对不同含水率混凝土试块进行加热时,混凝土升温特性会呈现不同的规律,如图13所示。2种加热路径下,表面温度相差100 °C左右,试块表面温度降幅差值基本一致;当试块基本达到饱和状态时,试块在5 kW加热路径下全部发生爆裂,爆裂时表面平均温度只达到132.4 °C,而破碎后混凝土内部温度高达238.8 °C。同一含水率状态下,加热功率越大,混凝土的表面温度越高,其升温速率越快。水分对混凝土试块在微波加热条件下的升温特性也有着重要的影响,由于混凝土内部水分蒸发作用,整

体来看, 含水率越高, 升温速率越缓慢; 对于干燥混凝土, 混凝土的介电特性保持不变, 同时, 没有蒸发的负热源作用, 升温速率呈线性快速增长; 随着含水率的增大, 温度降幅逐渐增大, 这是由于含水率相对较高, 混凝土在微波加热初期温度升高导致蒸发速率的增大。一方面, 混凝土平均温度升高导致混凝土中的水分含量减少, 混凝土的介电常数和损耗因子减少, 介电损耗产热能力降低; 另一方面, 水分蒸发散热也会引起混凝土温度的下降, 因此在微波场中, 含水率相对较高的混凝土在加热过程中, 温升速率较慢, 却会出现低温爆裂现象。

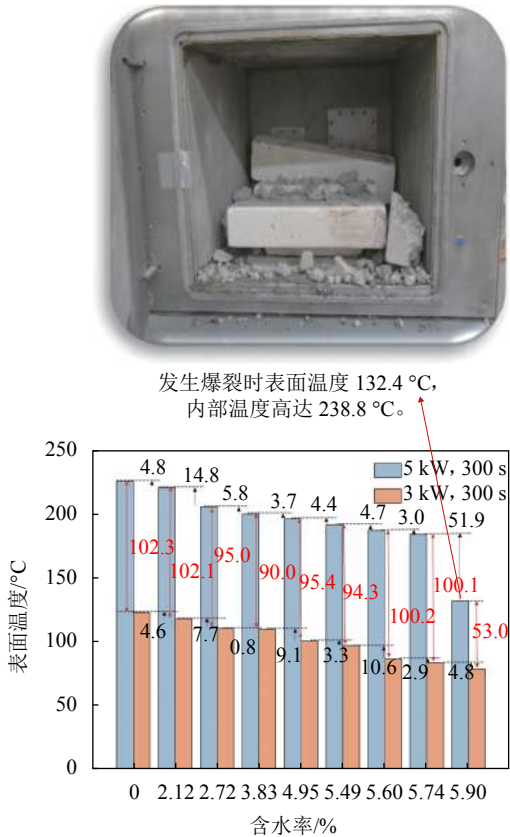


图 13 不同含水率试块在2种加热路径下的表面温度
Fig. 13 Surface temperature of blocks with different water content under two heating paths

3.4 单轴压缩强度

标准养护状态下, 含水率变化对试块单轴压缩强度影响如图14所示。由图14可见, 含水率变化对混凝土单轴压缩强度影响明显, 试块抗压强度随着含水率的增高而下降, 饱和状态下试块抗压强度值只有干燥状态下抗压强度值的71.3%, 下降明显[32]。

2种加热路径下混凝土试块含水率变化对其抗压强度影响结果如图15所示。由图15可见, 随着含水率的增加, 经过微波加热后混凝土单轴压缩强度逐渐降低。采用3 kW进行加热时, 抗压强度由干燥状态下的37.6 MPa降低到饱和状态下的27.9 MPa, 降低

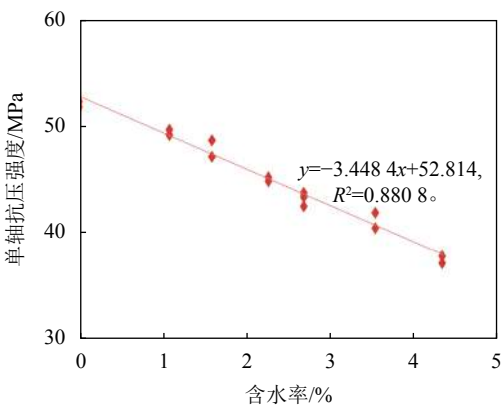


图 14 标准养护条件下试块抗压强度与含水率的关系
Fig. 14 Relationship between the compressive strength and moisture content under standard conservation

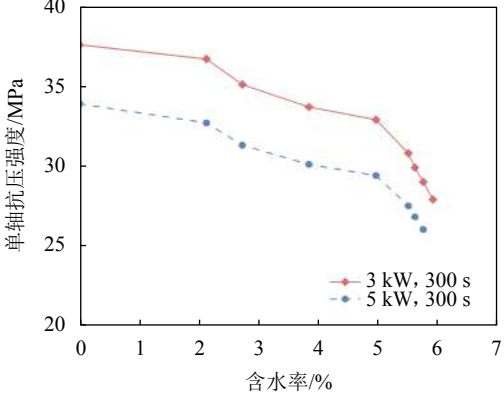


图 15 不同含水率混凝土试块在2种加热路径下的单轴抗压强度
Fig. 15 Uniaxial compressive strength of concrete blocks with different moisture content under two heating paths

25.8%; 采用5 kW进行加热时, 抗压强度在完全干燥状态下只有3 kW加热条件的90.2%, 含水率达到饱和时, 混凝土强度达到极限值, 全部发生爆裂。含水量的变化对混凝土内部结构及抗压强度有着重要的影响。相比干燥状态, 微波加热饱和试样产生更大的热力损伤; 在一定微波功率下, 混凝土强度随含水率的增加呈拟线性下降。高功率微波对混凝土强度的衰减程度更大, 说明高功率微波更有利于混凝土的破碎, 从能量消耗的角度来讲, 采用高功率微波, 可大幅度减少破碎时间, 显著降低混凝土破碎过程中的能量消耗。

4 微波辐射下混凝土低温爆裂机理

微波辐射下, 不同含水率混凝土在升温速率、砂浆-骨料界面分离效应、混凝土强度等方面有很大差异。而导致不同热力响应的影响因素是混凝土内的水分含量, 即水的存在。作为良好的微波吸收材料, 水的存在可以有效地影响加热效果, 当加热温度达

到一定水平时,水的形态变化会影响加热现象,即加热过程中的传质现象,这种水分的转化会对加热效果产生显著影响。试验结果表明,当试块含水率较高时,加热温度达到水的沸点,混凝土中的水分快速转换成水蒸气,在试块内部产生显著的孔隙压力,导致应变的产生,最终混凝土在低温下发生爆裂。

混凝土在微波场中低温爆裂现象是多个物理场共同耦合的结果,由以下原因共同作用:1)混凝土是一种多孔复合材料,内部存在大量的连通孔隙,比如裂隙、毛细孔等,为水分的运输提供了条件;微波加热下,各种形态的水分发生汽化,短时间内产生大量水蒸气,气态水扩散,形成孔隙压力。2)水泥基材料的内部热应力由热失配应力和热梯度应力2种应力组成。热失配应力是由砂浆和骨料之间的热膨胀系数(CTE)不同引起的,而热梯度应力是由砂浆和骨料在微波辐射下产生的温度差和同一材料内部温度场的不均匀引起的。3)孔隙压力和热应力最终导致了应变的产生,应力和应变是引起混凝土在微波场下低温爆裂的直接因素。

较大的含水量会增加爆炸剥落的风险和损坏的程度,蒸汽压理论可以更好地解释高含水量混凝土的爆裂现象^[33]。鞠杨等^[34]根据实测孔隙微观结构特征和蒸汽压分布规律,提出了“薄壁球”模型,定量分析孔隙内部蒸汽压引发的爆裂力学机理。

蒸汽压力影响范围内孔隙径向应力 σ_ρ 和环向应力 σ_r 分别表示为:

$$\begin{cases} \sigma_\rho = -\left\{\left(\frac{R^3}{\rho^3} - 1\right)\right\}q(T), \\ \sigma_r = \left\{\left(\frac{R^3}{2\rho^3} + 1\right)\right\}q(T) \end{cases} \quad (5)$$

式中: r 、 R 分别为蒸汽压力影响区域的内外径; ρ 为蒸汽压影响半径,球壁内 $r \leq \rho \leq R$ 的区域为混凝土基体;蒸汽压力 $q(T)$ 为饱和蒸汽压 q 和温度 T 的函数, $q(T)$ 值随温度 T 的增大而增大。

由此得出孔隙影响范围内侧:

$$\begin{cases} \sigma_\rho = -q(T), \rho = r; \\ \sigma_r = \frac{1/2K^3 + 1}{K^3 - 1}q(T), K = R/r \end{cases} \quad (6)$$

孔隙影响范围外侧:

$$\begin{cases} \sigma_\rho = 0, \rho = R; \\ \sigma_r = \frac{3/2}{K^3 - 1}q(T), K = R/r \end{cases} \quad (7)$$

式中, $K=R/r$ 为球壁特征尺寸,当 $K>1$, $\sigma_r^R > \sigma_r^r$ 。由式(5)可知,若孔壁厚度趋近于0,即内外壁的半径接近或相等时,内侧的环向拉应力迅速增大,当拉应力超过混凝土基体的抗拉强度时,孔隙内壁基体破裂,裂纹

在蒸汽压力的驱动下,迅速扩展到孔隙外壁,试块在众多孔隙内部蒸汽压的叠加作用下互相贯通,通过裂隙向试块外部“喷发”,发生爆裂(图16)。在骨料与水泥浆体之间的界面过渡区(interface transition zone, ITZ),水灰比较高,水分含量大且孔隙率高,结构较为松散,在微波辐射下温度升高更快,更高的热应力在ITZ处形成,促使孔隙贯通速率加快,进一步导致界面的弱化,可更有效地去除骨料表面附着砂浆。

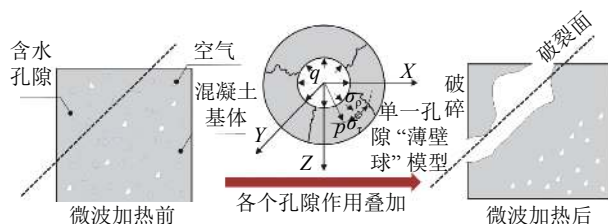


图 16 微波作用下混凝土低温爆裂机理

Fig. 16 Mechanism of concrete low temperature cracking under microwave

5 结 论

本文采用微波辅助混凝土破碎技术,进行微波辐射试验,并进行理论分析,研究微波辐射下含水率对混凝土强度弱化的影响规律,得到以下主要结论:

1)在一定的微波加热条件下,混凝土水分含量越高,其介电常数、损耗因子越大,吸收微波能力越强,试块表面产生的裂隙密度越大,由于水分蒸发散热作用,试块升温速率反而越低。

2)含水率相对较高时,采用高功率微波连续加热混凝土;在较低温度下,试块较短时间内就会发生爆裂,大部分碎块的破坏形态为沿晶断裂,骨料与砂浆分离界限明显,砂浆附着率低,可以从破碎后的混凝土中剔选出来较多完整的骨料。

3)微波对降低混凝土抗压强度是有效的。增大微波输入功率或水分含量可以显著提高混凝土内部温度梯度,加速裂纹的扩展,增高混凝土试块的热损伤程度,使混凝土强度折减有更好的效果。

4)微波功率和水分是混凝土破碎过程中的2个重要影响因素,通过对高含水率混凝土进行高功率条件下的微波辐射,借助其内部迅速产生的水蒸气,使孔隙压力超过混凝土的强度极限,在极短时间使混凝土爆裂,可以显著降低混凝土破碎循环利用过程中的能量消耗,最大限度地降低砂浆-骨料的黏结强度,去除黏着的砂浆基体,这对微波辅助废弃混凝土骨料回收技术具有重要的意义。

参考文献:

[1] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研

- 究报告2020:农村住宅专题[M].北京:中国建筑工业出版社,2020:9–12.
- [2] 珀雅润,隋同波.混凝土与可持续发展[M].周建,刘森,李晋梅,等,译.北京:化学工业出版社,2016:1–2.
- [3] Zhao Yu,Yu Miao,Xiang Yinghui,et al.A sustainability comparison between green concretes and traditional concrete using an emergy ternary diagram[J].*Journal of Cleaner Production*,2020,256:120421.
- [4] Xiao Jianzhuang,Wang Changqing,Zhu Binrong,et al.Shaking table model test of recycled concrete block masonry building structure[J].*Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*,2010,42(5):120–126.[肖建庄,王长青,朱彬荣,等.再生混凝土砌块砌体房屋结构振动台模型试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(5):120–126.]
- [5] Makul N,Rattanadecho P,Agrawal D K.Applications of microwave energy in cement and concrete—A review[J].*Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2014,37:715–733.
- [6] Kim K H,Cho H C,Ahn J W.Breakage of waste concrete for liberation using autogenous mill[J].*Minerals Engineering*,2012,35:43–45.
- [7] Hu Zhichun,Li Guoxin,Ouyang Mengxue.Research progress of waste concrete recycling[J].*Commercial Concrete*,2016(1):30–32.[胡治春,李国新,欧阳孟学.废弃混凝土回收利用的研究进展[J].商品混凝土,2016(1):30–32.]
- [8] Tsujino M,Noguchi T,Tamura M,et al.Application of conventionally recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment[J].*Journal of Advanced Concrete Technology*,2007,5(1):13–25.
- [9] Haque K E.Microwave energy for mineral treatment processes—A brief review[J].*International Journal of Mineral Processing*,1999,57(1):1–24.
- [10] Du Wenping.Research on selection technology of high quality recycled concrete aggregate[D].Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2017.[杜文平.高品质再生混凝土骨料剔选技术的研究[D].西安:西安科技大学,2017.]
- [11] Wei Wei,Shao Zhushan,Zhang Yuanyuan,et al.Fundamentals and applications of microwave energy in rock and concrete processing—A review[J].*Applied Thermal Engineering*,2019,157:113751.
- [12] Xiao Jianzhuang,Wu Lei,Fan Yuhui.Modification test of recycled coarse aggregate by microwave heating[J].*Concrete*,2012(7):55–57.[肖建庄,吴磊,范玉辉.微波加热再生粗骨料改性试验[J].混凝土,2012(7):55–57.]
- [13] Tsujino M,Noguchi T,Kitagaki R,et al.Completely recyclable concrete of aggregate-recovery type by a new technique using aggregate coating[J].*Journal of Structural and Construction Engineering*,2010,75(647):17–24.
- [14] Ong K C G,Akbarnezhad A.Microwave-assisted concrete technology[M].Boca Raton:CRC Press,2015:129–167.
- [15] Shao Zhushan,Wei Wei,Chen Wenwen,et al.Research progress and engineering application of microwave heating rock and concrete[J].*Engineering Mechanics*,2020,37(5):140–155.[邵珠山,魏玮,陈文文,等.微波加热岩石与混凝土的研究进展与工程应用[J].工程力学,2020,37(5):140–155.]
- [16] Taylor H F W.Cement chemistry[M].London:Thomas Telford,1997.
- [17] Akbarnezhad A,Ong K C G,Zhang M H,et al.Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates[J].*Construction and Building Materials*,2011,25(8):3469–3479.
- [18] Hu Guozhong,Yang Nan,Zhu Jian,et al.Experimental study on pore permeability characteristics and surface fracture evolution characteristics of water bearing coal under microwave irradiation[J].*Acta Coal Sinica*,2020,45(Supp2):813–822.[胡国忠,杨南,朱健,等.微波辐射下含水分煤体孔渗特性及表面裂隙演化特征实验研究[J].煤炭学报,2020,45(增刊2):813–822.]
- [19] Li He,Lin Boquan,Hong Yidu,et al.Evolution characteristics of coal pore fracture structure under microwave radiation[J].*Journal of China University of Mining and Technology*,2017,46(6):1194–1201.[李贺,林柏泉,洪溢都,等.微波辐射下煤体孔裂隙结构演化特性[J].中国矿业大学学报,2017,46(6):1194–1201.]
- [20] Dai Jun,Li Chuanjing,Yang Fan,et al.Effect of different moisture content on weakening strength of rock under microwave irradiation[J].*Water Power*,2018,40(1):31–34.[戴俊,李传净,杨凡,等.微波照射下含水率对岩石强度弱化的影响[J].水力发电,2018,40(1):31–34.]
- [21] Lu Gaoming,Li Hui,Liu Can,et al.Influence of water separation on wave velocity and strength of rocks under microwave irradiation[J].*Chinese Scientific Paper*,2019,14(9):1015–1021.[卢高明,李辉,刘灿,等.微波作用下水分对岩石波速和强度的影响[J].中国科技论文,2019,14(9):1015–1021.]
- [22] Gwarek W K,Celuch–Marcysiak M.Wide-band S-parameter extraction from FD–TD simulations for propagating and evanescent modes in inhomogeneous guides[J].*IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*,2003,51(8):1920–1928.
- [23] Metaxas A C,Meredith R J.Industrial microwave heating [M].London:Peter Peregrinus Ltd,1983.

- [24] McMaster R C. Nondestructive testing handbook. Volume 1—Leak testing[M]. Columbus: American Society of Nondestructive Testing, 1982.
- [25] Mingos D M P, Baghurst D R, Tilden L. Applications of microwave dielectric heating effects to synthetic problems in chemistry[J]. *Cheminform*, 1991, 22(36): 301–301.
- [26] Saxena K. Electromagnetic theory and applications[M]. Oxford: Alpha Science International, 2009.
- [27] Thostenson E T, Chou T W. Microwave processing: Fundamentals and applications[J]. *Composites Part A (Applied Science and Manufacturing)*, 1999, 30(9): 1055–1071.
- [28] Lu Gaoming, Li Yuanhui, Hassani F, et al. Experimental and theoretical research progress of microwave assisted mechanical rock breaking[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(8): 1497–1506. [卢高明, 李元辉, Hassani Ferri F, 等. 微波辅助机械破岩试验和理论研究进展[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(8): 1497–1506.]
- [29] Bengtsson N E, Risman P O. Dielectric properties of foods at 3 GHz as determined by a cavity perturbation technique, II. Measurements on food materials[J]. *The Journal of Microwave Power*, 1971, 6(2): 107–123.
- [30] Hassani F, Nekoovaght P M, Gharib N. The influence of microwave irradiation on rocks for microwave assisted underground excavation[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(1): 1–15.
- [31] Venkatesh M S, Raghavan G S V. An overview of dielectric properties measuring techniques[J]. *Canadian Biosystems Engineering*, 2005, 47(7): 15–30.
- [32] Liu Baodong, Li Pengfei, Li Lin, et al. Experiment on the influence of concrete moisture content on strength[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2011, 35(1): 9–12. [刘保东, 李鹏飞, 李林, 等. 混凝土含水率对强度影响的试验[J]. *北京交通大学学报*, 2011, 35(1): 9–12.]
- [33] Xiao Jianzhuang, Xie Qinghai, Xie Wengang. Study on high-performance concrete at high temperatures in China (2004—2016)—An updated overview[J]. *Fire Safety Journal*, 2018, 95(1): 11–24.
- [34] Ju Yang, Liu Hongbin, Tian Kaipei, et al. Study on micro pore structure and steam pressure change mechanism of RPC high temperature burst[J]. *Science in China (Technical Science)*, 2013, 43(2): 141–152. [鞠杨, 刘红彬, 田开培, 等. RPC 高温爆裂的微细观孔隙结构与蒸汽压变化机制的研究[J]. *中国科学(技术科学)*, 2013, 43(2): 141–152.]

(编辑 张凌之)

引用格式: Shao Zhushan, Zhang Pengju, Wei Wei, et al. Influence of moisture content on concrete mechanical properties under microwave irradiation[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(6): 93–102. [邵珠山, 张鹏举, 魏玮, 等. 微波辐射下含水率对混凝土力学性能影响[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(6): 93–102.]