

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.138



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



微波加热与传统加热下混凝土的热力学响应

邵珠山^{a,c}, 张宏亮^{b,c}, 魏玮^{a,c}, 张鹏举^{b,c}, 陈文文^{b,c}

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

摘要:传统混凝土破碎技术存在粗骨料损伤大、机械磨损严重和能耗高等弊端,这些问题可以通过在破碎前对混凝土进行微波处理来解决。为了评价微波处理技术的工业适用性,通过不同功率微波对混凝土试件进行加热,并与传统加热方式相比较,研究混凝土的加热效率和宏观裂纹扩展规律,而后进行单轴抗压强度试验,得到混凝土在不同热处理条件下的强度弱化规律。结果表明:与传统加热方式相比,微波加热技术能有效促进混凝土内部和表面裂纹扩展,削弱混凝土的强度,并且高功率微波下效率更高,能量消耗更少。此外,微波加热时未完全烘干的混凝土容易出现低温爆裂现象,爆裂时间与功率水平呈负幂函数关系,与烘干时间呈正幂函数关系。

关键词:混凝土;微波加热;传统加热;裂纹扩展机理;强度弱化规律

中图分类号:TU528.34 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)03-0107-09

Thermodynamic response of concrete under microwave heating and conventional heating

SHAO Zhushan^{a,c}, ZHANG Hongliang^{b,c}, WEI Wei^{a,c}, ZHANG Pengju^{b,c},
CHEN Wenwen^{b,c}

(a. School of Science; b. School of Civil Engineering; c. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: Traditional concrete crushing technology has the disadvantages such as large damage of coarse aggregates, serious mechanical wear and high energy consumption. These problems can be solved by microwave treatment of concrete before crushing. To evaluate industrial applicability of this technology, concrete specimens were heated by different microwave power, and compared with conventional heating method, the heating efficiency and macro-crack propagation mechanism of concrete were investigated. Then the uniaxial compressive strength test was carried out to obtain the strength weakening law of concrete under different heat treatment conditions. The results illustrate that compared with the conventional heating method, microwave heating technology can effectively promote the internal and surface crack propagation of concrete, thus reducing the strength of concrete, and has higher efficiency and less energy consumption under high

收稿日期:2021-03-18

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

作者简介:邵珠山(1968-),男,教授,博士生导师,主要从事混凝土和岩石材料热力学研究,E-mail:shaozhushan@xauat.edu.cn。

Received:2021-03-18

Foundation items:National Natural Science Foundation of China (No. 11872287); key R&D Program of Shannxi Province (No. 2019ZDLGY01-10)

Author brief: SHAO Zhushan (1968-), professor, doctoral supervisor, main research interests: thermodynamic response of concrete and rock materials, E-mail: shaozhushan@xauat.edu.cn.

microwave input power. Besides, the results show that the concrete which is not completely dried is easy to burst at low temperature under microwave heating, and the relationship between burst time and power level is a negative power function, and the relationship between burst time and drying time is a positive power function.

Keywords: concrete; microwave heating; conventional heating; crack propagation mechanism; strength reduction law

粗骨料占据了混凝土总体积的60%~75%,其生产主要依赖于开山及挖河采石,造成水土流失、河道破坏等一系列问题^[1]。建筑物施工、翻新和拆除过程中也产生了大量的废弃混凝土,制约着城市的发展^[2]。将废弃混凝土中的粗骨料资源化再利用不仅可以减少城市建筑垃圾,还能保护天然资源,实现混凝土的可持续利用^[3]。

对再生粗骨料回收利用的关键处理环节是破碎混凝土并将水泥砂浆与粗骨料分离。现有机械破碎技术对再生粗骨料造成损伤,且无法有效分离粗骨料和砂浆,导致再生粗骨料表观密度小、吸水率高及力学性能差等一系列问题。有学者提出,通过300℃高温加热可使水泥水化产物脱水,与骨料分离^[4]。与传统加热不同,微波加热具有加热速度快、能量利用率高、整体性加热和易控制等优点^[5]。根据微波加热的特性,材料可以被分为导体、绝缘体和吸收体^[6]。导体反射微波,常被用作加热腔;绝缘体可以使微波通过而不起作用;吸收体可以吸收微波并产生热量,这种吸收微波的材料被称为介电材料。但大部分材料同时含有绝缘体和吸收体,并不能同样地被微波加热,即微波加热具有选择性。在混凝土中,粗骨料和硬化砂浆的矿物组成不同导致两者介电性能差异较大,以至于微波加热过程中两者的升温速率不同而出现温度差和热膨胀差,进而形成应力梯度,使得粗骨料与砂浆分离^[7]。

已有研究表明^[8-11],微波加热技术可以增强混凝土的破碎程度,提高再生粗骨料的释放程度,也证明了微波加热可有效去除再生粗骨料表面粘结砂浆的可行性。Everaert等^[12]的研究结果表明,混凝土经传统机械破碎时骨料回收率为14%,而在3kW微波功率下照射60s后再进行机械破碎时,骨料的回收率达35%,且耗能更小。然而,这些研究条件各不相同,微波作用下混凝土的热效应及破坏模式

尚不清楚。Wei等^[13]采用微波照射单骨料混凝土发现,随着加热时间增加和微波功率增大,骨料和砂浆界面处首先出现裂纹并不断扩展,直至材料破坏,而且再生骨料的性能退化不明显。在此基础上,笔者展开了更深入的研究。

1 材料和方法

1.1 原材料及配合比

研究采用P·O 42.5水泥,其化学成分见表1。粗骨料选用玄武岩碎石,粒径4.75~20mm,连续级配。玄武岩是最常用的混凝土粗骨料,图1展示了在正交偏正光下观察到的岩相薄片显微图像,其中包含35%的辉石矿物,62%的斜长石以及3%的金属矿物。辉石矿物是一种强微波吸收材料^[14]。中砂,细度模数为2.6,其各项性能均符合《建设用砂》(GB/T 14684—2011)^[15]的要求。砂的主要化学成分是石英和方解石。基准混凝土配合比、坍落度及其抗压强度见表2。

表1 水泥化学成分

Table 1 Chemical compositions of cement

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

共制备100mm×100mm×100mm的立方体混凝土试件200块,其中,108块在3种微波功率下加热,36块用于传统加热。

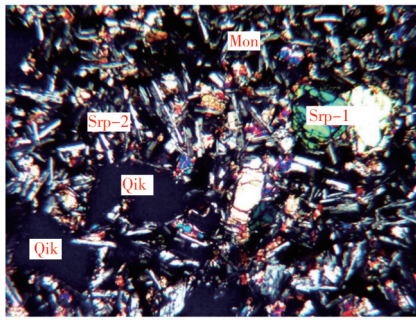
1.2 微波加热

微波加热采用湖南昌兆微波技术开发有限公司生产的工业多模微波加热系统(CY-MU1000C-L)进行。入射微波功率在0~6000W范围内可调,

表2 混凝土配合比及强度

Table 2 Mixture proportions and compressive strength of concrete

强度等级	W/C	配合比/(kg·m ⁻³)				砂率/%	坍落度/mm	抗压强度/MPa
		水泥	中砂	石子	水			
C20	0.60	358	654	1114	215	37.0	98	21.57



注: Srp: 辉石; Mon: 斜长石; Qik: 气孔。

图 1 玄武岩的岩相显微图像

Fig. 1 Petrographic microscopy images of basalt

水冷磁控管的工作频率为 2.45 GHz。微波输入功率和曝光时间由可编程逻辑控制器(PLC)和触摸屏控制,如图 2 所示。

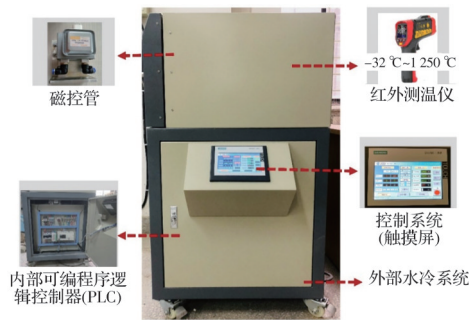


图 2 CY-MU1000C-L 多模工业微波加热系统

Fig. 2 CY-MU1000C-L multi-mode industrial microwave heating system

微波加热腔的尺寸为 410 mm×320 mm×414 mm,如图 3(a)所示,每个样品都放置在同样的位置,底部垫有氧化铝块(一种微波透明材料)。加热腔中的两个金属丝热电偶(不与微波反应)实时测量试样上表面和后表面的温度,并使用手持红外测温仪辅助测量试样左右表面和前表面的温度,测温点如图 3(c)所示,取所有测温点的平均值作为试样的表面温度。试样分别在 4、5、6 kW 微波功率下加热至表面温度为 100、150、200、250、300、350、400、450、500 °C,共 27 组,每组 4 个试样,取加热时间的平均值。

1.3 传统加热

传统加热采用洛阳力宇窑炉有限公司生产的 LYL-17LB 型马弗炉,如图 4 所示,其额定功率为 15 kW,设计温度为 1 300 °C,控温精度±1 °C,加热腔尺寸为 300 mm×500 mm×300 mm。对马弗炉也设定了和微波加热相同的 9 种温度,共 9 组试样,并以最大功率进行加热,采用热电偶实时测量试件的

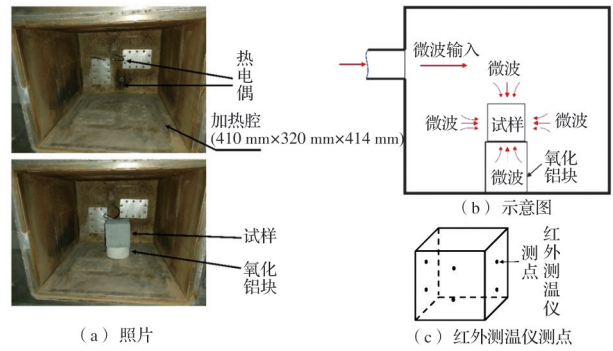


图 3 工作频率为 2.45 GHz 的多模微波系统和测温示意图

Fig. 3 Schematic diagram of multimode microwave system operating at a frequency of 2.45 GHz and temperature measurement

表面温度。每组 4 个试件,取加热时间的平均值。

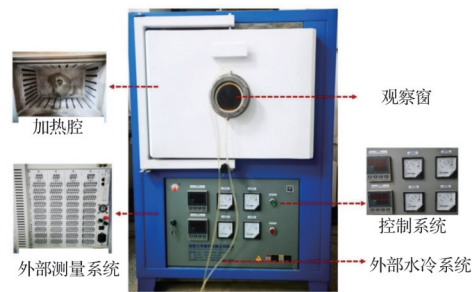


图 4 LYL-17LB 常规加热炉加热系统

Fig. 4 LYL-17LB conventional furnaces heating system

1.4 单轴抗压强度测试

采用 TYA-2000 型电液式压力试验机测定。按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2016)^[16]的要求进行,每组 3 个试件,取平均值,5 个未进行热处理的试样作为对照试样。

2 结果与讨论

2.1 微波加热低温爆裂现象

经 28 d 标准养护完成后,部分试样由于未进行烘干,在微波加热时出现了低温炸裂现象,如图 5 所示。试验结果表明,以 100 °C 烘干未达到 15 h 的试件大部分会出现炸裂现象,试件炸裂时经红外线测温枪测出碎片的温度通常在 90~130 °C 之间。首先,微波具有穿透性,在混凝土中可以作为一个体积分布的热源,其次,水作为一种良好的微波吸收材料,在微波作用下会快速升温并蒸发,当蒸发速率超过水蒸气向外迁移的速率时,孔隙压力就会增大,从而在不透水结构处产生拉应力,导致混凝土破坏^[17]。



图 5 微波加热下试件炸裂

Fig. 5 Specimen bursting at microwave heating

试样在高微波功率下发生炸裂所需的时间较短,图6显示了未经过烘干的试样在不同功率下的炸裂时间,其含水率在4.22%左右,炸裂时间与功率水平之间的拟合关系为负幂函数。当微波输入功率较低时,试件并未出现炸裂现象,这是因为在低功率下单位时间内试样吸收的微波能量较少,升温速率较慢,导致水分蒸发速率较慢而不会出现孔隙压力较大的情况。图7显示了在6 kW微波功率下试件炸裂时间与烘干时间的关系,随着试件增加的烘干时间,炸裂所需的时间也增加。当烘干时间超过8 h,低功率下试件不再出现炸裂现象,超过15 h,试件几乎未出现炸裂。因此,较高含水量的试件在微波加热过程中升温速率较快,会出现更大的孔隙压力^[18],有利于混凝土破碎和粗骨料的释放。

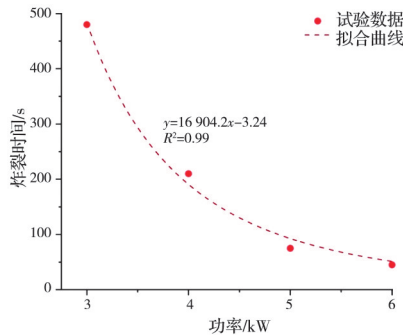


图 6 未烘干试样的炸裂时间与功率水平的幂关系

Fig. 6 Power relationship between the burst time and power level for samples not dried

2.2 加热效率

在100℃条件下烘干15 h后,36组试件的加热效率如图8所示,每个数据点代表4个试件加热时间的平均值。在3种恒定的微波功率下,试件的表面温度随着微波照射时间几乎呈线性增加,且输入功率越高,升温速率越快。传统加热过程中,在温度达到250℃之前,试件的升温速率较慢,之后升温速率较快,温度随时间呈线性增加。加热温度从室

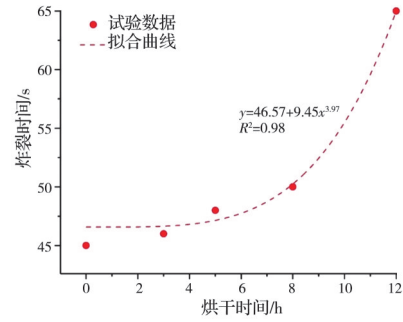


图 7 6 kW 微波功率下试件的炸裂时间与烘干时间的关系
Fig. 7 The relationship between bursting time and drying time of specimens at 6 kW power

温20℃开始,微波加热下试件的表面温度随着加热时间迅速升高,升温速率远大于传统加热。在100℃左右,传统加热的时间是6 kW微波功率下的16倍,而500℃时,两者加热时间相差5倍,所以传统加热效率低于微波加热主要出现在试件升温前期。这是因为传统加热机制是热传递,即热量通过对流、传导和辐射的方式由周围环境传递到物体表面,然后物体由外到内被逐渐加热^[19]。微波加热与传统加热有着根本不同,微波是以电磁波的形式存在,可以深入材料内部,使得材料从体积上开始加热,是由电磁能转化为热能的过程,几乎不需要加热腔体的升温时间。

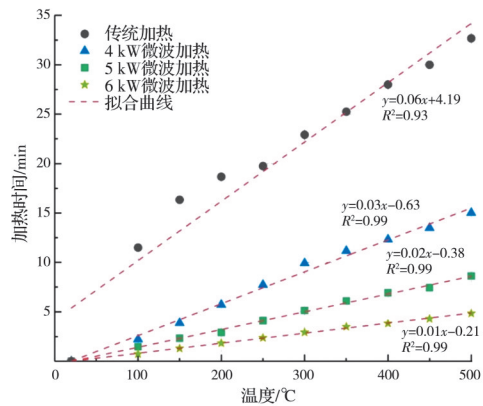


图 8 试样表面温度和热处理时间的函数

Fig. 8 Surface temperatures as a function of heat treatment time for the specimens

如图9所示,玄武岩粗骨料作为强微波吸收材料,温度随着加热时间迅速升高,其升温速率远大于混凝土表面。且由于热传导效应的影响,粗骨料单独在微波照射下的升温速率大于其在混凝土中的升温速率。

表3列出了试件表面温度达到500℃时的加热

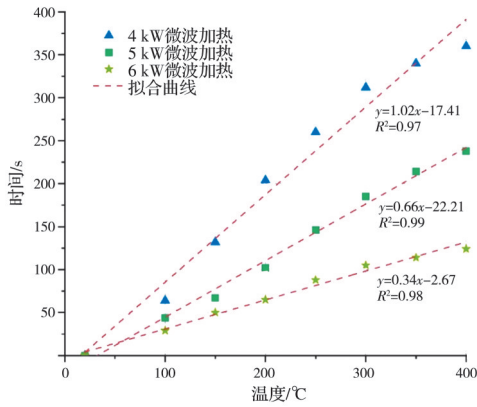


图 9 玄武岩粗骨料的温度和热处理时间的函数

Fig. 9 Temperatures as a function of heat treatment time for basalt coarse aggregate

时间、能量消耗和升温速率。传统加热辅助混凝土破碎技术的主要缺点是降低混凝土强度所需的能量输入大于机械破碎消耗的能量,而微波辅助混凝土破碎技术在降低混凝土强度的同时所需的能量大大减少。两者加热技术耗能差异大的主要原因是微波直接作用于试样,对加热腔几乎没有影响,不会造成能量浪费。而传统加热的能量需要由加热腔传递到试样表面,加热速度慢,能量散失较多。Omran 等^[20]通过比较铁矿石在微波炉与传统炉中热处理后可磨性的变化得出传统炉消耗的能量是微波炉的 225 倍。此外,提高微波输入功率的结果很明显,混凝土在快速升温的同时消耗的能量更少。

表 3 各加热方式下将试样加热至 500 °C 时的能量消耗和加热速率

Table 3 Energy consumption and heating rate of the samples were heated to 500 °C under different heating methods

加热方式	500 °C 时试件的加热时间/s	能量消耗/kJ	升温速率/(°C·s ⁻¹)
传统加热	1 960	29 412	0.26
4 kW 微波加热	901	3 600	0.55
5 kW 微波加热	518	2 592	0.97
6 kW 微波加热	290	1 728	1.72

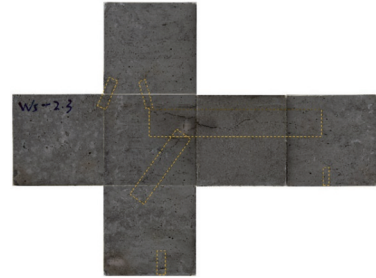
2.3 裂纹扩展过程

热处理后,几乎所有经微波加热过的试件表面均出现裂纹,而经马弗炉加热的试件仅有极少部分出现裂纹。图 10 和图 11 展示了不同热处理方式下立方体试样的表面裂纹展开图。

由图 10 可知,在 4、5、6 kW 微波功率下,当温度分别达到 200、150、100 °C 时,试件表面开始出现裂



(a) 4 kW 微波功率, 200 °C



(b) 5 kW 微波功率, 150 °C



(c) 6 kW 微波功率, 100 °C

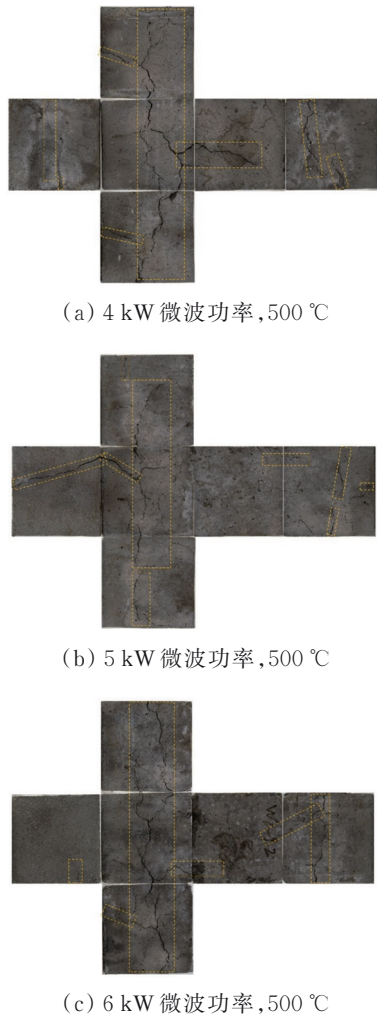


(d) 传统加热, 500 °C

图 10 试件表面裂纹萌生

Fig. 10 Crack initiation on the surface of the specimens

纹。由此可见,高功率微波短时间照射会使得混凝土更容易出现裂纹,即在相同温度下,高功率微波照射对于混凝土破碎效果更佳,这与 Chen 等^[21]的研究结果一致,其主要原因是高功率下混凝土中的热失配应力和温度梯度应力更大。图 10(d) 中显示,传统加热下,500 °C 时试件表面才出现贯穿裂纹。一方面,由于传统加热不具有体积加热特性且加热速率慢,混凝土被均匀加热,不会产生较大的热梯



(a) 4 kW 微波功率, 500 °C

(b) 5 kW 微波功率, 500 °C

(c) 6 kW 微波功率, 500 °C

图 11 试件表面裂纹扩展

Fig. 11 Crack propagation on the surface of the specimen

度应力。另一方面,虽然粗骨料的热膨胀系数($5 \times 10^{-6} \sim 13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)小于水泥砂浆的热膨胀系数($11 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),但只有在 $400 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 时才可以产生一定的热膨胀,形成热失配应力,导致骨料-砂浆界面断裂,同时,足够的热量致使水泥水化物脱水引起孔隙结构变化,产生再生裂缝^[22-23]。微波加热试件到达 500°C 时,表面裂纹形态如图 11 所示,裂纹的数量、宽度和长度均增加,但主要裂纹沿 4 个侧表面和下底面扩展,上底面裂纹数量较少,这可能是试件在浇筑和振捣的过程中,上底面处粗骨料分布很少,不会出现热失配应力引起的裂纹扩展。

传统加热和 6 kW 微波加热下试件的横截面见图 12。传统加热下,温度低于 400°C 时,混凝土内部结构紧凑,粗骨料和砂浆连接完好; 500°C 时,粗骨料和砂浆界面的孔隙有所增加。而微波加热下, 200°C 时试件内部即有明显的裂纹产生; 300°C 时,粗骨料和砂浆界面出现明显裂纹并有潜在的脱开现象; 400°C 时,混凝土破坏,粗骨料脱落。显然,微波加热过程中,混凝土破坏主要发生在粗骨料-砂浆界面处,这是热失配应力和热梯度应力共同作用的结果,削弱了砂浆-粗骨料界面的黏结力,有利于消除再生粗骨料表面的粘结砂浆。然而,微波加热到 500°C 时,个别粗骨料出现熔融现象,这是因为微波加热下玄武岩粗骨料升温比硬化砂浆快。因此,混凝土在破碎过程中表面温度不宜超过 400°C ,避免骨料损伤。

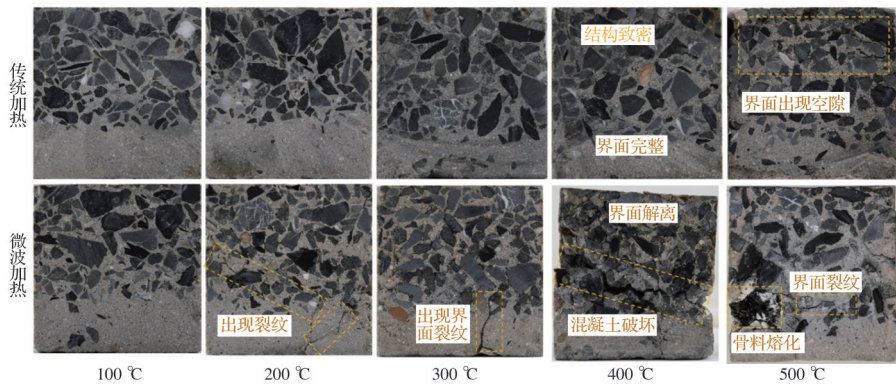


图 12 混凝土在不同温度下的横截面图像

Fig. 12 Cross-section images of concrete at different temperatures

试件经热处理后,在 MATLAB 中利用 rgb2gray 函数将 RGB 模式下的源图像转换为灰度图像,采用二值化算法对灰度图像进行二值化,其中,一些像素被二值化为裂缝,另一些作为背景。

6 kW 微波功率下试件表面的二值化图像如图 13 所示。在 MATLAB 中, $m \times n$ 大小的灰度图像被记录为 m 行 n 列的矩阵,每个像素被记录为一个整数,从最暗的 0 到 255。由于试件表面裂纹大的颜色比其

他地方深,大津阈值算法可以很好地区分裂纹和背景^[24]。试件表面裂纹面积占试件表面积

定义为宏观裂纹密度,结果见图 14,每个数据点代表 4 个试件宏观裂纹密度的平均值。

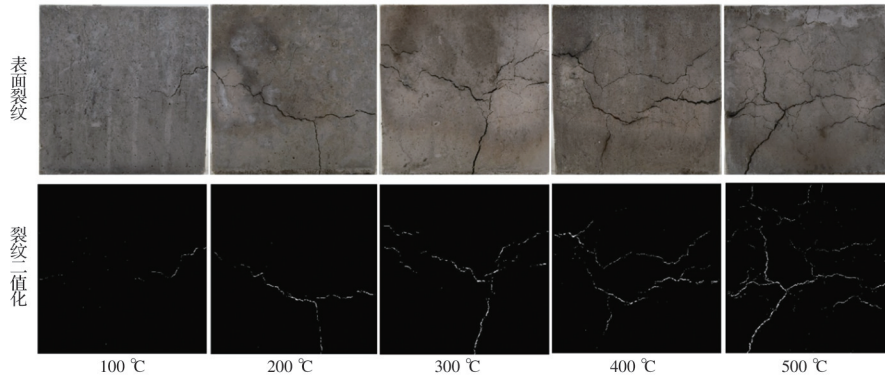


图 13 6 kW 微波功率下裂纹的源图像和二值化图像

Fig. 13 Source images and binary images of cracks at 6 kW microwave power

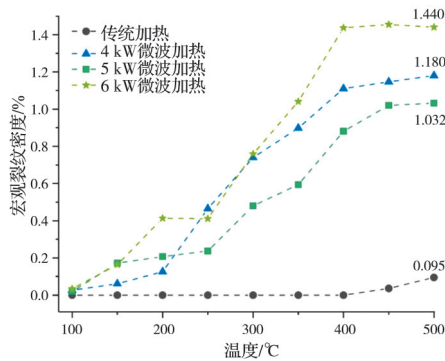


图 14 各温度下试块表面的宏观裂纹密度

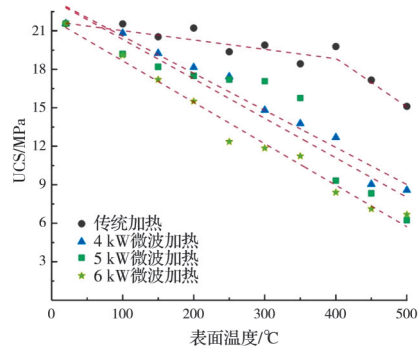
Fig. 14 Macroscopic crack density of specimen surface at different temperatures

图 14 中,试件经微波处理后,随着温度升高,宏观裂纹密度不断增大。在 100~200 °C 之间,高功率下试件表面裂纹的扩展速率较快。200~400 °C 之间,3 种功率下试件的裂纹密度持续增大,这是因为混凝土升温过程中,砂浆和骨料之间的温差及砂浆基体中的不均匀温度场会不断增大,导致热应力增大,砂浆-骨料界面及砂浆内部逐渐出现裂缝并向外扩展。400 °C 以后,低功率下试件的宏观裂纹密度增长缓慢,而高功率下试件的裂纹不再增加,这是因为此时大部分骨料和砂浆已经分离,材料完全破坏。然而,传统加热下只有温度达到 450 °C 时试件表面才出现少量裂纹,并不能有效致使混凝土破坏。

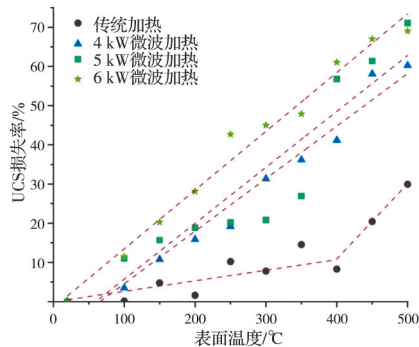
2.4 单轴抗压强度

各加热条件下试件的单轴抗压强度与表面温度和热处理时间的关系分别见图 15、图 16,每个数据点代表 3 个试样的单轴抗压强度平均值。

2.4.1 表面温度和强度 图 15 中,在 3 种微波功率下,随着温度升高,试件的强度几乎呈线性显著降低。相同温度下,高功率处理过的试件强度值下降较多,6 kW 微波功率下在 500 °C 时试件强度损失率达 70% 左右。而在传统加热过程中,在 400 °C 之前,随着温度升高,试件的强度值只是整体趋势略



(a) 单轴抗压强度值



(b) 单轴抗压强度损失百分率

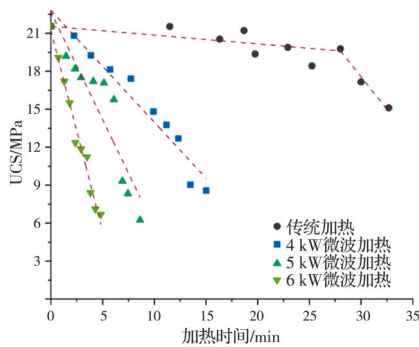
图 15 单轴抗压强度值和单轴抗压强度损失百分率作为温度的函数

Fig. 15 The UCS values and UCS loss percentage as a function of temperature

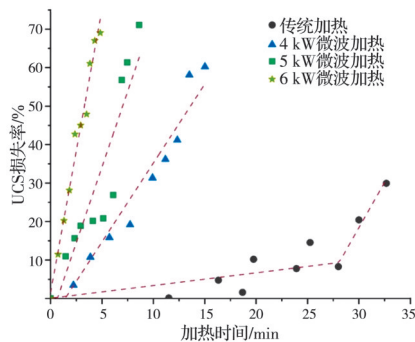
有降低,400℃之后,试件强度下降较快,在500℃时强度损失率达到30%。

在微波加热过程中,随着温度升高,混凝土内部的裂纹萌生和扩展引起表面裂纹出现及混凝土强度降低,内部裂纹主要表现为界面裂纹的发展,说明砂浆-骨料界面裂纹的逐渐发展导致了混凝土强度降低。然而,在传统加热过程中,温度较低时不存在试件内部裂纹产生的条件,因此试件强度变化很小。

2.4.2 热处理时间和强度 两种加热方式下试件强度的弱化速率如图16所示。微波加热在短时间可以使混凝土的强度大幅度下降,而在马弗炉中长时间加热后,其强度依然很高,33 min仅降低了30%,而在6 kW微波功率下只需110 s,是传统加热时间的1/18。因此,微波处理下混凝土的强度弱化效率远远高于传统加热。



(a) 单轴抗压强度值



(b) 单轴抗压强度损失百分率

图16 单轴抗压强度值和单轴抗压强度损失百分率作为时间的函数

Fig. 16 The UCS values and UCS loss percentage as a function of heating time

微波功率对于试件强度的弱化速率有很大影响,从图16可以看出,功率越高,强度降低速度越快。经5 min微波照射后,4 kW功率下UCS降低了14%,5 kW功率下降低21%,而6 kW功率下降低

了约70%。微波功率和照射时间是影响混凝土强度的重要参数,在每种功率水平下,强度降低可以通过照射时间的线性关系估计,用于指导工业应用。

3 结论

微波辅助混凝土破碎的目的是预先削弱砂浆-粗骨料界面的粘结强度,再与机械破碎方法相结合剔选出粗骨料,既能轻易地消除粘结砂浆,又不会在破碎过程中损伤粗骨料。结果表明,在200~400℃之间,微波照射可以使骨料-砂浆界面出现裂纹,弱化混凝土的强度,达到粗骨料释放的效果,并且高功率照射效率更高。值得注意的是,混凝土表面温度不超过400℃可以减少再生粗骨料的损伤,且需要额外试验保证再生粗骨料的质量才能加快微波技术在再生粗骨料回收领域的应用。

以微波破碎混凝土技术为背景,与传统加热方式相比,研究了微波加热下混凝土的破坏特征,主要结论如下:

1)以100℃烘干不足15 h的混凝土试件在微波加热时容易出现低温爆裂现象,爆裂时间与微波输入功率呈负幂函数关系,与烘干时间呈正幂函数关系。

2)微波加热效率远远大于传统加热,尤其是在加热初期。微波输入功率越高,加热速率越快,加热至相同温度所需能量越少,同功率下混凝土的加热时间和表面温度呈线性关系。

3)与传统加热方式相比,微波加热后混凝土表面的宏观裂纹密度更大,功率越高,裂纹密度越大,混凝土强度折减程度越大。当混凝土表面温度不超过400℃时,粗骨料和砂浆界面裂纹的发展是混凝土破坏和强度降低的主导因素。反之,传统加热下混凝土内部几乎不出现裂纹,强度变化很小。

参考文献

- [1] MEHTA K P. Reducing the environmental impact of concrete [J]. Concrete International, 2001, 10(3): 18-22.
 - [2] WU Z Z, YU A T W, SHEN L Y, et al. Quantifying construction and demolition waste: An analytical review [J]. Waste Management, 2014, 34(9): 1683-1692.
 - [3] 周静海, 吴迪, 赵庭钰, 等. 废弃纤维再生混凝土受压徐变及预测模型[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6): 143-151.
- ZHOU J H, WU D, ZHAO T Y, et al. Pressure and creep characteristics of waste fiber recycled concrete and

- estimation model [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(6): 143-151. (in Chinese)
- [4] DE JUAN M S, GUTIÉRREZ P A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(2): 872-877.
- [5] 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, 165.
- SHAO Z S, WEI W, CHEN W W, et al. Research progress and industrial applications of microwave heating processing on rock and concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(5): 140-155, 165. (in Chinese)
- [6] WEI W, SHAO Z S, QIAO R J, et al. Recent development of microwave applications for concrete treatment [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 269: 121224.
- [7] WEI W, SHAO Z S, CHEN W W, et al. Experimental study on thermal and mechanical behavior of mortar-aggregate under microwave irradiation [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 34: 101947.
- [8] 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.
- [9] BRU K, TOUZÉ S, BOURGEOIS F, et al. Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2014, 126: 90-98.
- [10] LIPPIATT N, BOURGEOIS F. Investigation of microwave-assisted concrete recycling using single-particle testing [J]. *Minerals Engineering*, 2012, 31: 71-81.
- [11] CHOI H, LIM M, CHOI H, et al. Using microwave heating to completely recycle concrete [J]. *Journal of Environmental Protection*, 2014, 5(7): 583-596.
- [12] EVERAERT M, STEIN R, MICHAUX S, et al. Microwave radiation as a pre-treatment for standard and innovative fragmentation techniques in concrete recycling [J]. *Materials*, 2019, 12(3): 488.
- [13] WEI W, SHAO Z S, QIAO R J, et al. Workability and mechanical properties of microwave heating for recovering high quality aggregate from concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 276: 122237.
- [14] KAHRAMAN S, CANPOLAT A N, FENER M. The influence of microwave treatment on the compressive and tensile strength of igneous rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 129: 104303.
- [15] 建设用砂: GB/T 14684—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- Sand for construction: GB/T 14684—2011 [S]. Beijing: China Standards Press, 2011. (in Chinese)
- [16] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2016 [S]. Beijing: China Standards Press, 2016. (in Chinese)
- [17] LIEBEZEIT S, MUELLER A, LEYDOLPH B, et al. Microwave-induced interfacial failure to enable debonding of composite materials for recycling [J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2017, 14: 29-36.
- [18] AKBARNEZHAD A, ONG K C G. Thermal stress and pore pressure development in microwave heated concrete [J]. *Computers & Concrete*, 2011, 8(4): 425-443.
- [19] WEI W, SHAO Z S, ZHANG Y Y, et al. Fundamentals and applications of microwave energy in rock and concrete processing: A review [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 157: 113751.
- [20] OMRAN M, FABRITIUS T, MATTILA R. Thermally assisted liberation of high phosphorus oolitic iron ore: A comparison between microwave and conventional furnaces [J]. *Powder Technology*, 2015, 269: 7-14.
- [21] CHEN W W, SHAO Z S, WEI W. Experimental study of the heating potential of mortar-aggregate under microwave irradiation [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33(7): (ASCE)MT. 1943-5533. 0003782.
- [22] KIM K H, CHO H C. Breakage of waste concrete by free fall [J]. *Powder Technology*, 2010, 200(3): 97-104.
- [23] KIM K Y, YUN T S, PARK K P. Evaluation of pore structures and cracking in cement paste exposed to elevated temperatures by X-ray computed tomography [J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 50: 34-40.
- [24] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.