

# 微波辐照下铁尾矿水泥混凝土的损伤规律

程道华<sup>1</sup>,赵之仲<sup>1\*</sup>,康宪章<sup>2</sup>,成娜<sup>1</sup>

1. 山东交通学院交通土建工程学院,山东 济南 250357;2. 山东工壹建设工程有限公司,山东 济南 250306

**摘要:**为充分发挥铁尾矿的吸波发热特性,实现矿山固废资源高值化利用,将铁尾矿以粗骨料形式掺入水泥混凝土中,分析微波辐照作用下铁尾矿水泥混凝土的损伤规律,对铁尾矿石粒料进行X射线衍射物相分析,研究铁尾矿吸波升温机理,分析微波辐照下铁尾矿石粒料和铁尾矿水泥混凝土的温度变化,以及铁尾矿水泥混凝土在微波辐照前后的超声波声速变化规律;采用扫描电子显微镜观察微波辐照前后铁尾矿混凝土试块的表面形貌及微观结构,研究内部微观损伤。研究表明:铁尾矿石中的含铁氧化物吸波能力较好,铁尾矿石和石灰石的温度均随微波辐照时间的增加而升高,升温速率随辐照时间的增加而减小,铁尾矿石的温度增幅比石灰石大;微波辐照时间相同时,铁尾矿水泥混凝土试块的温度随辐照功率的增大而升高,辐照功率为6 kW时吸波效率最高,试块辐照前后的温差随辐照时间的增加先线性升高后增速放缓;铁尾矿水泥混凝土试块的超声波声速均随辐照时间和辐照功率的增大而减小,辐照功率相同时,试块的超声波声速衰减率随辐照时间的增加先快速增大后增速放缓,辐照功率为0、2、4、6、8 kW、辐照0~5 min时,超声波声速衰减率最高可达35.29%;经微波辐照处理后,试块铁尾矿与砂浆界面过渡区产生1~3 μm的热应力裂纹并沿界面扩展。

**关键词:**微波辐照;铁尾矿石;超声波声速;水泥混凝土

**中图分类号:**U416.216;U414

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2026)01-0087-09

**引用格式:**程道华,赵之仲,康宪章,等.微波辐照下铁尾矿水泥混凝土的损伤规律[J].山东交通学院学报,2026,34(1):87-95.

CHENG Dao-hua, ZHAO Zhi-zhong, KANG Xian-zhang, et al. Damage patterns of cement concrete with iron tailing under microwave radiation[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2026, 34(1): 87-95.

## 0 引言

矿产资源是我国重要的战略资源,属于不可再生资源<sup>[1]</sup>。伴随矿产资源开采产生的大量尾矿占用大量地面资源,还极易引发严重的环境问题<sup>[2-3]</sup>。目前我国铁尾矿累计达60亿t<sup>[4]</sup>,尽管已采取回收有价值的金属元素再利用、回填料等相关处理措施<sup>[5-6]</sup>,综合利用率也仅约20%。随着建筑行业发展,混凝土用量和砂石骨料需求日益增加<sup>[7-8]</sup>。将铁尾矿替代混凝土中的粗集料,可减少尾矿污染,解决原材料短缺问题,降低建造成本,符合绿色发展理念<sup>[9]</sup>。

吕绍伟等<sup>[10]</sup>研究发现随着铁尾矿在混凝土中的质量分数不断增大,铁尾矿混凝土的抗氯离子侵蚀性能、抗冻性能越好,耐久性越好;Lu等<sup>[11]</sup>制备以铁尾矿砂石替代天然砂石的铁尾矿骨料高性能混凝土,其中C40混凝土的立方体抗压强度可达60 MPa,满足工程要求<sup>[12]</sup>;Barati等<sup>[13]</sup>通过试验研究铁尾矿的水泥/膨润土稳定性,发现加入膨润土的水泥-铁尾矿混合料可满足基层材料的无侧限抗压强度要求;

**收稿日期:**2025-05-12

**基金项目:**山东省自然科学基金面上项目(ZR2021ME207);山东省交通厅交通科技创新计划项目(2023B05-03)

**第一作者简介:**程道华(1999—),男,山东青岛人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设,E-mail:1183434068@qq.com。

**\*通信作者简介:**赵之仲(1978—),男,山东德州人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为路基路面工程、BIM技术等,E-mail:zhaozhizhong@sdjtu.edu.cn。

王俊宇等<sup>[14]</sup>采用尾矿骨料制备自密实混凝土,成型所需水泥用量减少,但拌和物的和易性和工作性仍保持良好,自密实混凝土的成本至少减少30元/m<sup>3</sup>;刘圣洁等<sup>[15]</sup>研究发现铁尾矿沥青混合料的高温动稳定度为6851次/mm,比玄武岩沥青混合料增大16.55%,同时水稳定性和抗滑性等各项路用性能均能满足规范要求<sup>[16]</sup>。

微波加热技术具有高效、低污染及安全可控的优点,广泛应用于辅助破岩、拆除混凝土构筑物等技术领域。王苑朴<sup>[17]</sup>通过微波技术处理隧道开挖过程中的硬岩,发现微波对岩石的劣化作用与微波照射时间成正比;钟焱<sup>[18]</sup>采用微波对水泥混凝土进行辐照,验证了微波破碎混凝土的可行性;戴俊等<sup>[19]</sup>、李栋焯<sup>[20]</sup>分析不同微波功率、微波加热时间、水冷却等因素对混凝土强度降低的正向影响,分析混凝土的强度劣化机理;Zheng等<sup>[21]</sup>发现粗骨料的微波敏感性显著影响混凝土的加热特性,持续微波辐照会导致粗骨料与砂浆间形成裂缝。已有文献多对普通混凝土进行微波辐照研究,对加入吸波骨料的水泥混凝土的研究较少。

本文研究在微波辐照下,以铁尾矿石取代传统粗集料制备的水泥混凝土的温度变化及内部损伤。对铁尾矿石颗粒进行X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)物相分析以及微波辐照,揭示铁尾矿石的吸波能力机理以及微波辐照下的温度变化规律;制备铁尾矿混凝土试块,通过红外热成像仪以及混凝土超声检测仪检测铁尾矿水泥混凝土试块辐照前后的温度变化以及内部损伤情况;通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)分析铁尾矿混凝土的损伤机理,以为微波快速拆除结构物工程提供参考。

## 1 原材料与试验设计

### 1.1 试验材料及设备

选用普通硅酸盐水泥P·O 42.5,性能指标如表1所示,满足文献[22]相关要求;粗集料为铁尾矿石料,性能指标如表2所示,满足文献[23]要求;细集料为普通河砂,性能指标如表3所示,其力学性能满足文献[24]要求;试验用水为济南市普通自来水;减水剂为萘系减水剂FDN-C。

表1 水泥性能指标

项目	安定性/ mm	凝结时间/min		标准稠度 用水量/%	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	细度(80 μm 筛余)/%	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	28 d 干缩率/%	耐磨性/ (kg·m <sup>-2</sup> )
		初凝	终凝						
试验结果	2.6	185	410	28.0	380	3.6	3 120	0.06	2.1
指标要求 <sup>[22]</sup>	≤5.0	≥45	≤600	≤30.0	300~400	≤10.0	≈3 100	≤0.10	≤3.0

表2 粗集料性能指标

项目	碎石压碎指标/%	吸水率/%	含泥量/%	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
石灰石检测结果	7.5	0.20	0.4	2 658	1 462
铁尾矿石检测结果	6.8	0.34	0.5	2 762	1 547
指标要求 <sup>[23]</sup>	<15.0	<2.00	<1.0	>2 500	>1 350

表3 细集料性能指标

项目	含水率/%	云母质量分数/%	含泥量/%	泥块质量分数/%	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
检测结果	0.8	1.5	1.05	0.25	2 710	1 430
指标要求 <sup>[24]</sup>	0.8	<2.0	<2.00	<1.00	>2 500	>1 350

选择大型工业微波系统作为微波辐照装置,额定电压为380 V,可调辐照功率为0~10 kW,系统主要由控制系统、微波腔体、微波发生器以及监控系统4部分组成。采用红外热成像仪H16,采集微波辐照后

的铁尾矿石粒料及铁尾矿水泥混凝土试块温度; 采用混凝土超声波检测仪 HC-U81, 测量微波辐照前、后的铁尾矿水泥混凝土试块的声速, 检测仪装配有发射换能器和接收换能器, 试验时在双探头上涂抹凡士林作为耦合剂后紧贴试块两端测量。

### 1.2 试验方案

采用 X 射线衍射仪对铁尾矿石粒料进行 XRD 测试, 分析铁尾矿石粒料的矿物组成; 对铁尾矿石粒料和普通石灰石进行微波辐照, 通过红外热成像仪采集材料辐照后的温度, 对比二者的升温速率, 验证铁尾矿石粒料具有更强的吸波能力, 在微波辐照下能更快速升温。

采用铁尾矿石替代传统粗集料制备铁尾矿 C40 水泥混凝土试块, 铁尾矿水泥混凝土参考配合比如表 4 所示, 待试块养护结束后取出。

普通水泥混凝土、铁尾矿水泥混凝土试块的破坏荷载分别为 510.84、471.16 kN, 抗压强度分别为 48.53、44.76 MPa。铁尾矿水泥混凝土试块的抗压强度大于 42.10 MPa, 符合工程要求<sup>[14]</sup>。采用混凝土超声检测仪测试辐照前铁尾矿水泥混凝土试块的超声波声速; 采用工业微波炉对铁尾矿水泥混凝土试块进行不同辐照时间、辐照功率的微波辐照, 采用红外热成像仪采集不同微波辐照时间下铁尾矿水泥混凝土试块的温度, 试块冷却至室温后, 采用混凝土超声检测仪测试试块的超声波声速, 对比辐照前、后超声波声速变化, 反映微波辐照对试块内部损伤的影响, 采用扫描电镜对试块表面进行微观分析。试验流程如图 1 所示。

表 4 铁尾矿水泥混凝土参考配合比

材料	与水泥的质量比	质量浓度/(kg·m <sup>-3</sup> )
水	0.41	175.00
水泥	1.00	431.00
细集料	1.19	512.00
粗集料	2.90	1 250.00
减水剂	0.01	4.31

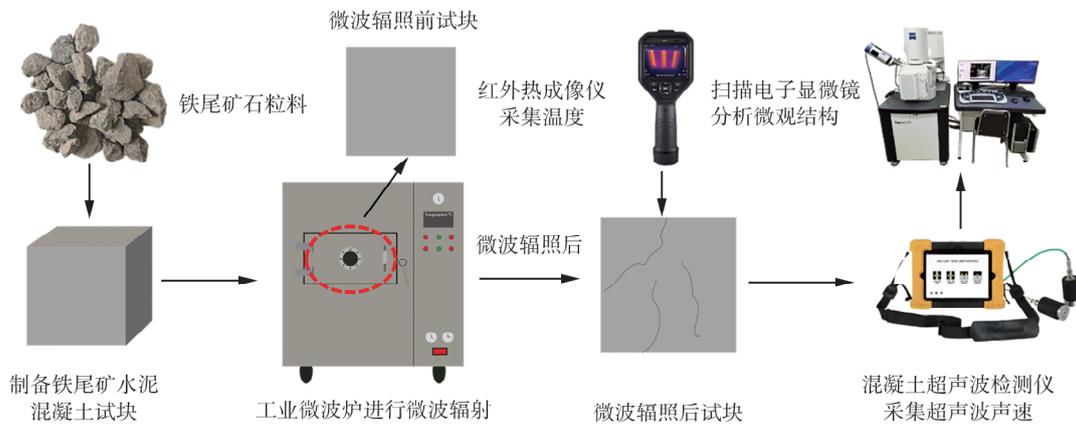


图 1 试验流程

## 2 试验结果与分析

### 2.1 XRD 物相分析

铁尾矿石对微波的吸收能力取决于其矿物成分。铁尾矿中的铁氧化物对微波具有较高的吸收能力, 铁氧化物具有较高的介电损耗和磁损耗, 会吸收微波能量, 并将其转化为热量。四川会理铁尾矿石 XRD 衍射图如图 2 所示。与标准粉末衍射卡相应特征峰位置比对分析, 标注各衍射峰的对应该矿物。

由图 2 可知: 铁尾矿石中主要含有铁韭闪石 (NaCa<sub>2</sub>Fe<sub>4</sub>AlSi<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>22</sub>(OH)<sub>2</sub>)、钠长石 (Na(AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>))、

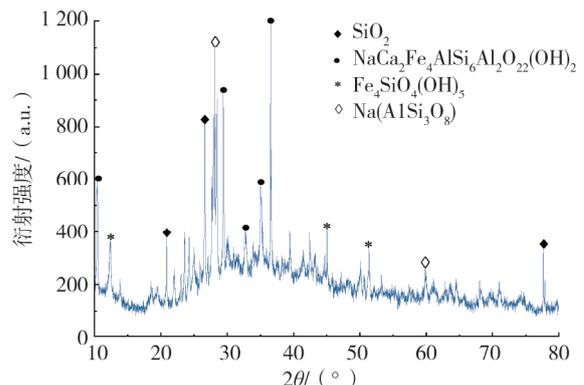


图 2 铁尾矿石 XRD 衍射图

蛇纹石( $\text{Fe}_4\text{SiO}_4(\text{OH})_5$ )和石英( $\text{SiO}_2$ )等矿物,其中,铁非闪石最多,其次是钠长石和蛇纹石,还含有少量石英。XRD 通常用于定性分析,图谱中铁非闪石属于单斜晶系,是富含铁元素的闪石矿物;钠长石是硅酸类矿物,属于长石族系列,衍射强度较高,结晶性较好;蛇纹石属于层状结构,其结构中包含铁、硅和氧,形成层状的硅氧四面体。这几种成分的介电常数相对较高,能较好地与微波场互动,吸收微波能量。石英的吸波能力通常较低。通过矿物成分组成来看,铁尾矿石有较好的吸波能力,在微波辐照条件下的升温速率较高。

### 2.2 微波辐照铁尾矿石粒料升温速率分析

采集铁尾矿石和石灰石在微波辐照下的试验数据,分析其微波吸收能力的差异。在室温  $25\text{ }^\circ\text{C}$  下取等量铁尾矿石和石灰石各  $(150\pm 10)\text{ g}$ , 粒径为  $9.5\sim 19.0\text{ mm}$ , 分别均匀地摊铺在陶瓷皿器上,放入功率为  $800\text{ W}$  的微波炉的旋转底座上进行微波辐照。

采用秒表采集数据,采用红外热成像仪每隔  $60\text{ s}$  快速平稳地采集矿石温度,不同辐照时间下铁尾矿石红外热成像如图 3 所示,铁尾矿石和石灰石粒料的温度随辐照时间的变化如图 4 所示,升温速率随辐照时间的变化如图 5 所示。

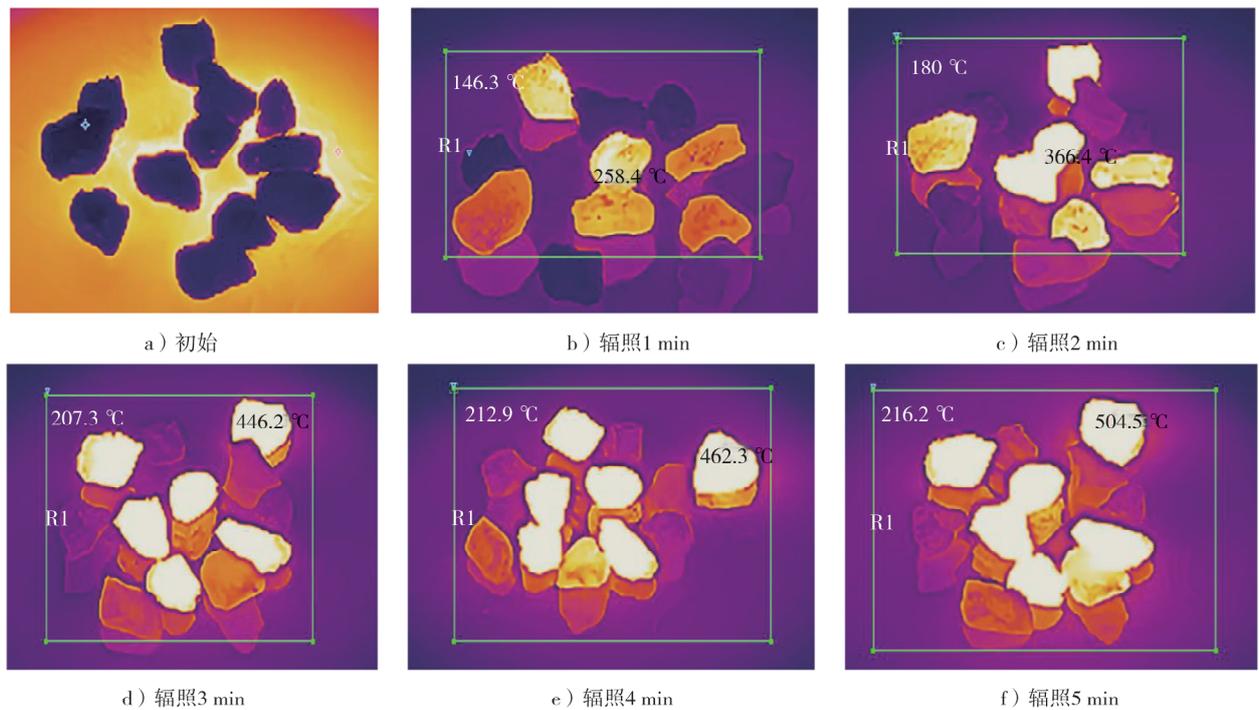


图 3 微波辐照铁尾矿石红外热成像图

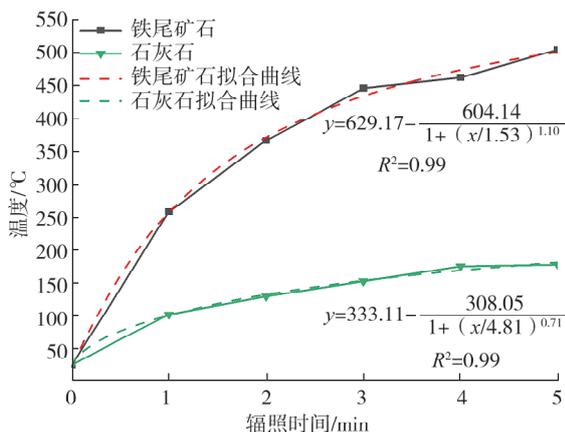


图 4 粒料温度变化与辐照时间的关系曲线

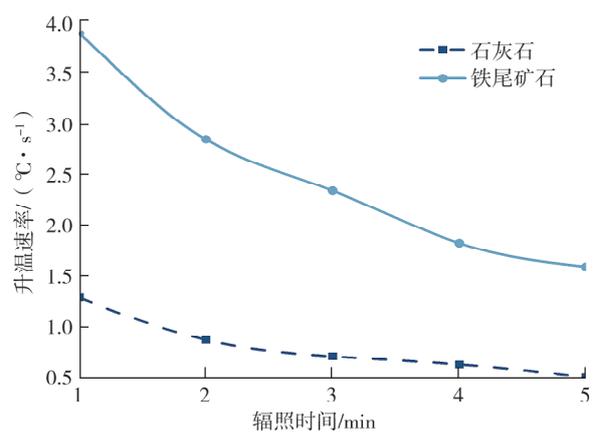


图 5 粒料升温速率与辐照时间的关系曲线

由图 4 可知: 铁尾矿石和石灰石的温度均随辐照时间的增加而升高, 铁尾矿石的温度增幅比石灰石大, 铁尾矿石吸收微波的能力比石灰石好; 温度与辐照时间的函数关系拟合曲线的决定系数均为 0.99, 拟合效果较好, 拟合曲线符合 Logistic 模型函数关系。当微波辐照铁尾矿石时, 矿石中的吸波性矿物吸收微波, 在微波电场的作用下, 矿物分子内部的电荷产生振动, 分子间摩擦并转化为热能。在初始温度均为 25 °C 的情况下, 微波辐照矿石粒料 1 min 后, 铁尾矿石温度升至约 260 °C, 比初始温度高约 235 °C, 石灰石温度仅升至 100 °C, 比初始温度高 75 °C; 微波辐照矿石粒料 5 min 时, 铁尾矿石温度升至 500 °C, 最终温度为初始温度的 20 倍, 石灰石温度升至 177 °C。

由图 5 可知: 铁尾矿石的升温速率比石灰石快, 前者整体升温速率是后者的 3 倍, 升温速率随辐照时间的增加而减小, 在 5 min 内, 铁尾矿石的升温速率由 3.89 °C/s 降至 1.59 °C/s, 升温速率减小 60%。

### 2.3 微波辐照下混凝土温度变化规律

微波辐照加热不同于传统加热(由外向内传导)方式, 微波能量直接穿透材料, 在内部微波能量被吸收转化为热量, 铁尾矿石表面因散热较快导致升温较慢, 内部温度高于外部, 但温度变化趋势相同, 采用表面平均温度表征内部温度的变化规律。不同微波辐照功率  $P$  和辐照时间  $t$  是导致铁尾矿水泥混凝土损伤程度不同的重要因素。

在不同参数的微波辐照下, 采用红外热成像仪采集微波辐照时铁尾矿水泥混凝土试块的表面温度, 研究辐照时间和功率与铁尾矿水泥混凝土表面温度变化的关系。铁尾矿水泥混凝土试块热成像如图 6 所示, 不同辐照功率和时间下铁尾矿水泥混凝土试块温度变化如图 7 所示。不同辐照条件下微波辐照前、后混凝土试块温度差如图 8 所示。

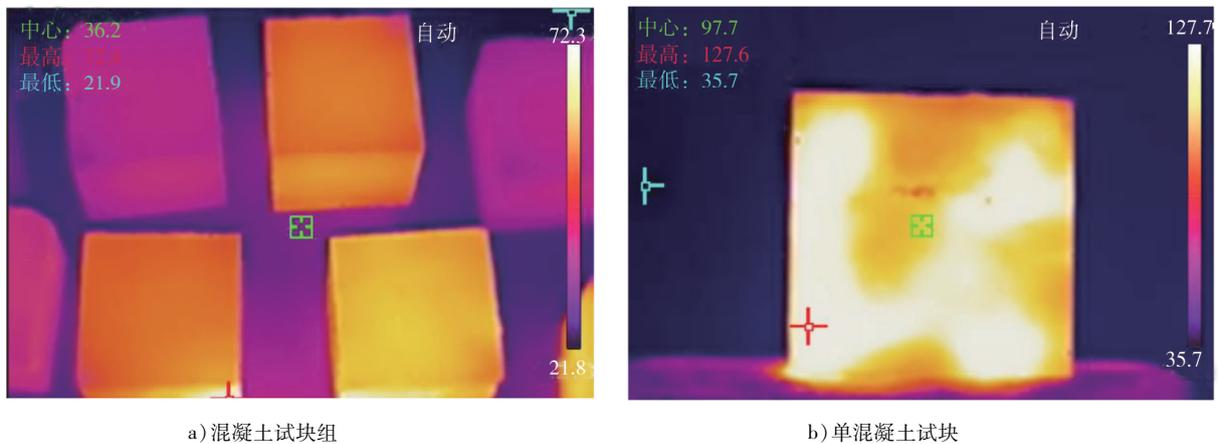


图 6 铁尾矿水泥混凝土试块热成像

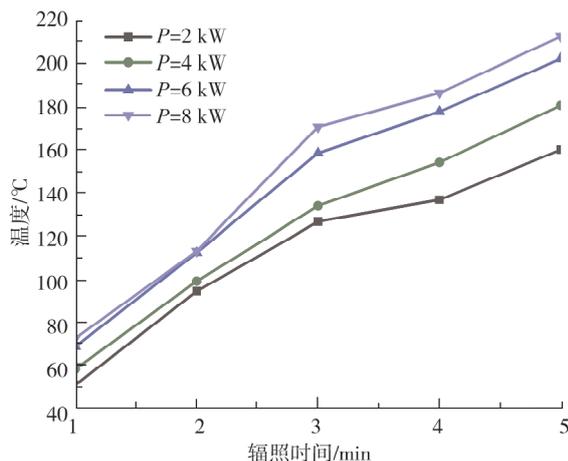


图 7 不同辐照功率下混凝土试块温度随辐照时间的变化

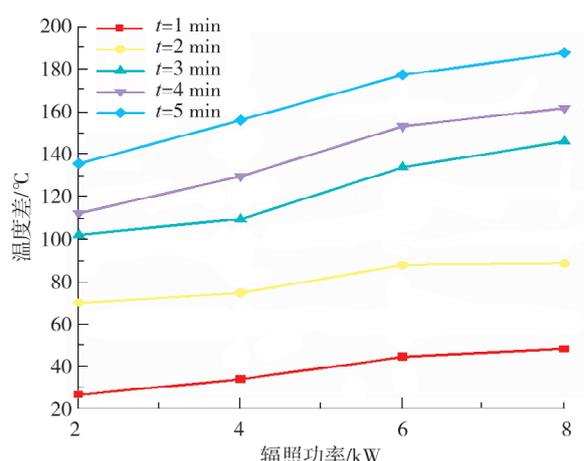


图 8 不同辐照条件下微波辐照前后混凝土试块温度差

由图7可知:辐照时间相同时,铁尾矿水泥混凝土试块温度随微波辐照功率的增大而升高;在微波辐照小于2 min时,不同辐照功率下试块温度近乎线性升高;辐照功率为6 kW时,与辐照功率为4 kW的温度变化曲线的间距最大,说明辐照功率为6 kW时铁尾矿混凝土对微波能量的吸收效率最高,此时能更好地发挥铁尾矿的吸波能力;辐照功率为8 kW时,与辐照功率为6 kW时试块的温度变化趋势几乎相同,温度增幅不大,对微波能量利用率明显小于辐照功率为6 kW时。

由图8可知:辐照功率相同时,铁尾矿水泥混凝土试块辐照前后温度差随辐照时间的增加而增大,不同辐照时间下,辐照前后铁尾矿水泥混凝土试块温度差随辐照功率的增大先快速增大后增速放缓。在相同辐照功率下,微波辐照时间小于3 min时试块温度增幅较大,辐照3 min后试块升温速率放缓,主要原因是辐照未及3 min时,温度变化主要源于材料内部铁尾矿骨料的介电损耗效应,铁尾矿是敏感吸波材料,在微波场中通过介电损耗和磁滞损耗将电磁能快速转化为热能,与周围砂浆进行热量传递;辐照3 min后,随着温度的升高,热辐射损失(遵循 Stefan-Boltzmann 定律)急速增长,此时部分热量被环境耗散,升温变慢。

#### 2.4 微波辐照前后试块超声波声速变化规律

超声波的传播快慢与混凝土的密实程度有直接关系,微波辐照前后超声波声速的变化能较好地反映混凝土内部的缺陷、裂隙的发育情况,采用超声波声速作为混凝土内部损伤的参考指标之一。不同微波辐照功率和时间下铁尾矿水泥混凝土试块超声波声速变化情况如表5所示,超声波声速衰减率随辐照时间的变化曲线如图9所示。

表5 不同辐照条件下铁尾矿水泥混凝土试块的超声波声速

P/kW	超声波声速/(km·s <sup>-1</sup> )					
	t=0	t=1 min	t=2 min	t=3 min	t=4 min	t=5 min
2	3.06	2.99	2.90	2.81	2.77	2.71
4	3.06	2.86	2.74	2.59	2.23	2.45
6	3.06	2.78	2.57	2.36	2.28	2.21
8	3.06	2.71	2.46	2.25	2.11	1.98

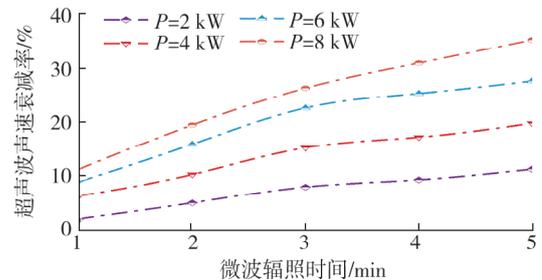


图9 超声波声速衰减率随微波辐照时间变化曲线

由表5可知:辐照功率相同时,铁尾矿水泥混凝土试块的超声波声速随辐照时间的增加而减小;辐照时间相同时,铁尾矿水泥混凝土试块的超声波声速随辐照功率的增大而减小。微波辐照前铁尾矿水泥混凝土试块的超声波声速为3.06 km/s,在辐照功率为8 kW、辐照5 min后出现超声波最低声速,为1.98 km/s,此时铁尾矿水泥混凝土损伤最大。

由图9可知:当辐照功率相同时,铁尾矿水泥混凝土试块的超声波声速衰减率随辐照时间的增加先快速增大后缓慢增大,辐照时间大于3 min后,逐渐接近平滑曲线,这与试块表面温度变化趋势基本一致,其原因是具有强吸波特性的铁尾矿骨料通过介电损耗效应高效吸收微波能并转化为热能,骨料与周围砂浆在界面处形成显著温度梯度,这种热力学差异导致骨料-砂浆界面产生热应力集中,当热应力超过界面黏结强度时,即会产生微裂纹并扩展,累积的界面损伤造成混凝土整体力学性能的劣化;辐照3 min后,因热传递作用,界面处热应力减弱。微波辐照的前3 min,铁尾矿水泥混凝土试块的损伤迅速累积,辐照大于3 min后,试块损伤增长趋缓。在微波功率为2、4、6、8 kW时,铁尾矿水泥混凝土试块超声波声速衰减率最高可达35.29%。

#### 2.5 微波辐照前后混凝土微观损伤研究

微波辐照对铁尾矿水泥混凝土的微观结构具有显著破坏效应。采用扫描电镜观察未经微波处理和经微波辐照功率为8 kW、辐照3 min处理的铁尾矿水泥混凝土试块,得到表面形貌、微观结构、界面过渡区(interfacial transition zone, ITZ)结构等信息,如图10所示,研究其裂缝发育及微观结构变化规律。

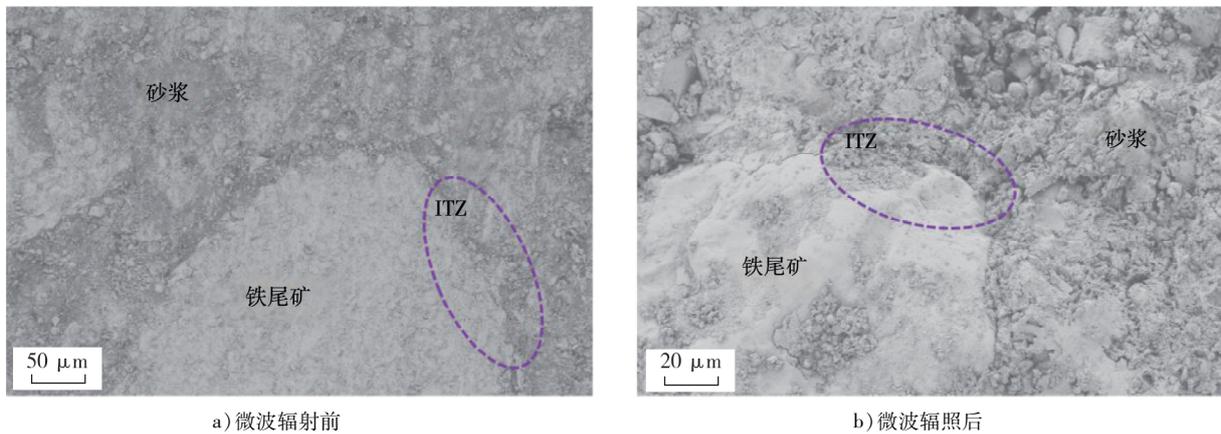


图10 微波辐照前、后铁尾矿水泥混凝土试块表面的SEM图

由图10a)可知:未受微波辐照时,铁尾矿水泥混凝土试块内部仅存少量初始微裂纹,骨料与砂浆界面结合紧密。经微波辐照处理后,界面过渡区产生裂纹,原因是铁尾矿骨料与砂浆的微波吸收率及热膨胀系数不同,辐照过程中铁尾矿快速升温而砂浆温升滞后,二者界面处形成温度梯度,产生剧烈热应力。

由图10b)可知:这种温度梯度导致界面过渡区出现 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 的定向裂缝,且裂缝沿铁尾矿与砂浆结合面扩展,造成界面的黏结作用失效。微观分析表明,铁尾矿表面因高热膨胀发生变形,而温度较低的砂浆无法同步形变,最终在热应力集中区域形成贯穿性裂缝,成为混凝土结构松散化的关键诱因。

### 3 结论

研究铁尾矿水泥混凝土在微波辐照下的内部损伤变化规律。对铁尾矿石粒料进行XRD物相分析,揭示铁尾矿石的吸波能力机理;制备铁尾矿水泥混凝土试块,研究试块在微波辐照下的温度变化规律,以及超声波声速变化情况,得出铁尾矿水泥混凝土内部的损伤规律。

1)铁尾矿石中含有的吸波性矿物(含铁氧化物)能更好地吸收微波,铁尾矿石的升温能力比石灰石强,当微波辐照至5 min时,铁尾矿石温度升至 $500\ \text{C}$ ,石灰石温度只升至 $177\ \text{C}$ ;铁尾矿石的升温速率随辐照时间的增加而降低,在辐照过程中由 $3.89\ \text{C/s}$ 降低至 $1.59\ \text{C/s}$ 。

2)微波辐照下,铁尾矿水泥混凝土试块的温度近乎线性升高,试块升温幅度先快后慢,在辐照功率为6 kW及辐照3 min情况下,试块内部能有效产生温度梯度,此时易产生最大损伤。

3)试块的超声波声速变化表明微波辐照会对铁尾矿水泥混凝土造成显著影响:微波辐照时间、功率越大,超声波声速越小,超声波声速衰减率越大,对试块的损伤越大,微波辐照时间小于3 min时,试块内部铁尾矿与砂浆间的界面破坏,导致超声波声速衰减率增加较快,在辐照功率为2、4、6、8 kW时,超声波声速衰减率最高可达35.29%。

4)采用扫描电镜扫描铁尾矿水泥混凝土试块表面,显示粗骨料与砂浆界面过渡区形成裂缝,原因是在微波辐照作用下,铁尾矿因高吸波性快速升温,与温升滞后的砂浆间形成显著温度梯度,导致界面过渡区产生 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 的热应力裂纹。这些裂纹沿骨料-砂浆结合面扩展,造成界面黏结失效,形成贯穿性裂缝,最终削弱混凝土内部结合力并引发结构松散。

#### 参考文献:

- [1] 李冰,唐彪,马振.铁尾矿资源综合利用状况探讨[J].内蒙古煤炭经济,2023(18):28-30.
- [2] 段晓阳,李学锋,吴高善,等.某尾矿库回采技术及坝体稳定性分析[J].矿业研究与开发,2023,43(1):48-54.
- [3] 吴义军,沈振中,张文兵.尾矿库溃坝过程模拟及防护措施对比[J].水电能源科学,2022,40(11):90-93.
- [4] HAN X Y, WANG Y P, ZHANG N, et al. Facile synthesis of mesoporous silica derived from iron ore tailings for efficient

- adsorption of methylene blue[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 617: 126391.
- [5] MALTSEV Y, MALTSEVA S, MALTSEVA I. Diversity of cyanobacteria and algae during primary succession in iron ore tailing dumps[J]. *Microbial Ecology*, 2022, 83(2):408-423.
- [6] LI S, WU J L, HUO Y L, et al. Profiling multiple heavy metal contamination and bacterial communities surrounding an iron tailing pond in Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141827.
- [7] 张丽霞. 机制砂中石粉含量对混凝土性能影响研究[J]. *砖瓦*, 2024(2):57-59.
- [8] 国家发展改革委. 关于促进砂石行业健康有序发展的指导意见[EB/OL]. (2020-03-27)[2025-04-28]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jd/jd/202003/t20200327\\_1224297.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jd/jd/202003/t20200327_1224297.html).
- [9] 申艳军, 白志鹏, 郝建帅, 等. 尾矿制备混凝土研究进展与利用现状分析[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(3):845-857.
- [10] 吕绍伟, 姜屏, 钱彪, 等. 铁尾矿砂力学特性及再生利用研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(2):466-470.
- [11] LU D, ZHONG J, YAN B, et al. Effects of curing conditions on the mechanical and microstructural properties of ultra-high-performance concrete (UHPC) incorporating iron tailing powder[J]. *Materials (Basel)*, 2021, 14(1):E215.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.
- [13] BARATI S, TABATABAIE SHOURIJEH P, SAMANI N, et al. Stabilization of iron ore tailings with cement and bentonite: a case study on Golgohar mine[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(8):4151-4166.
- [14] 武俊宇, 武俊慧, 聂法智, 等. 利用矿山废石制备自密实混凝土及其工程应用[J]. *混凝土*, 2011(9):96-98.
- [15] 刘圣洁, 唐亮, 赵硕, 等. 铁尾矿沥青混合料的路用性能[J]. *山东交通学院学报*, 2023, 31(3):81-86.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTGE 20—2011[S]. 北京:人民交通出版社, 2011.
- [17] 王苑朴. 微波照射下不同地区花岗岩强度劣化的试验研究[D]. 西安:西安科技大学, 2020.
- [18] 钟焱. 微波破碎水泥混凝土可行性及影响因素研究[D]. 西安:长安大学, 2022.
- [19] 戴俊, 杨凡, 李栋烁, 等. 微波照射下钢筋混凝土黏结强度损伤演化[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(3):52-58.
- [20] 李栋烁. 微波照射下钢筋混凝土粘结损伤特性研究[D]. 西安:西安科技大学, 2019.
- [21] ZHENG Y L, HE Z A, FU H Y, et al. Microwave heating and fracturing of concrete with different aggregates: an experimental and numerical study[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 470: 140667.
- [22] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程:JTG 3420—2020[S]. 北京:人民交通出版社, 2021.
- [23] 中华人民共和国交通运输部. 公路水泥混凝土路面施工技术细则:JTG/T F30—2014[S]. 北京:人民交通出版社, 2014.
- [24] 中国建筑材料联合会. 建筑用砂:GB/T14684—2022[S]. 北京:中国标准出版社, 2022.

## Damage patterns of cement concrete with iron tailing under microwave radiation

CHENG Daohua<sup>1</sup>, ZHAO Zhizhong<sup>1\*</sup>, KANG Xianzhang<sup>2</sup>, CHENG Na<sup>1</sup>

1. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Gongyi Construction Engineering Co., Ltd., Jinan 250306, China

**Abstract:** To fully leverage the wave-absorbing and heating properties of iron ore tailings and achieve high-value utilization of mining solid waste, this study incorporates iron ore tailings into cement concrete as coarse aggregates to investigate the damage patterns of iron ore tailing concrete under microwave irradiation. X-ray diffraction (XRD) phase analysis is performed on iron ore tailing particles to study the microwave heating

mechanism. The temperature changes of iron ore tailing particles and concrete, as well as the ultrasonic pulse velocity (UPV) variations of iron ore tailing concrete before and after microwave irradiation, are analyzed. Scanning electron microscopy (SEM) is employed to observe the surface morphology and microstructure of the concrete before and after irradiation to investigate internal micro-damage. The results indicate that the iron-containing oxides in iron ore tailings possess superior wave-absorbing capabilities. The temperatures of both iron ore tailings and limestone increase with irradiation time, while the heating rate decreases; however, the temperature rise of iron ore tailings is larger than that of limestone. At the same irradiation time, the temperature of iron ore tailing concrete increases with increasing power. The wave-absorbing efficiency is highest at 6 kW. The temperature difference of the specimens before and after irradiation increases linearly at first and then slows down with increasing irradiation time. The UPV of the concrete decreases with increasing irradiation time and power. At the same power, the UPV attenuation rate increases rapidly initially and then slows down with increasing time. Under 0.2, 4, 6, 8 kW power and 0~5 min irradiation, the UPV attenuation rate can reach up to 35.29%. After microwave irradiation, 1~3  $\mu\text{m}$  thermal stress cracks are generated in the interfacial transition zone between iron ore tailings and mortar and propagate along the interface.

**Keywords:** microwave irradiation; iron tailing; ultrasonic wave sound speed; cement concrete

(责任编辑:王惠)

.....  
(上接第 79 页)

using low-density ethylene-styrene copolymer-based high-modulus agents, and their technical performance is evaluated. Three kinds of self-reactive high modulus asphalt are prepared with rather lower content (6%, 7% and 8%) of low-density ethylene-styrene copolymer as high modulus agent by pure mixing process, then the dispersion state and modification mechanism of high modulus agent are analyzed based on microscopic and physicochemical properties. The reasonable content of high modulus agent is selected based on the results of macroscopic performance test. Furthermore, the high modulus asphalt mixture with the preferred modifier content is prepared and its pavement performance is evaluated by laboratory tests. Results show that the modification process of self-reactive high modulus asphalt is a combination of the physical action of the high modulus agent and the chemical reaction between the asphalt binder and the modifier. The preferred high modulus agent content is 7% (by mass of the asphalt), which is 50%–80% of the modifier content in the dry-process. In this condition, the microscopic dispersion effect of the high modulus agent and the low-temperature performance of high modulus asphalt are desirable, and the PG high-temperature grade of high modulus asphalt is improved by one grade compared with that of the conventional high modulus asphalt. In addition to its superior high temperature performance, the high modulus asphalt mixture with optimum modifier content exhibited an 18% improvement in low-temperature destructive strain relative to conventional high modulus asphalt mixture with dry-process, while also achieving a 2 to 3 times extension in fatigue life.

**Keywords:** low-density ethylene-styrene copolymer; high modulus agent; self-reactive high modulus asphalt; microscopic property; rheological characteristics; pavement performance

(责任编辑:王惠)