

文章编号:1007-9629(2021)01-0106-09

多孔微波吸收功能集料制备及性能研究

王智¹, 何坚¹, 王子仪², 梁淑哲¹, 刘振华¹

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆交通大学交通运输学院, 重庆 400074)

摘要: 采用页岩、有机物(米粒)、锰锌铁氧体,通过模板法烧结制备多孔微波吸收功能集料,研究了该集料以及用该集料制备的功能砂浆的微波吸收性能。结果表明:在本体系中,在1 000 ℃下烧结30 min后,即可制备出孔结构可控且抗压强度为6.5 MPa的多孔微波吸收功能集料;孔径为245~833 μm、有机物掺量为25%时,微波辐照30 s的功能集料和功能砂浆微波辐照温升最高,可分别从室温升至218.8、119.4 ℃,功能砂浆融冰时间为48.5 s;多孔结构能改善功能集料与自由空间阻抗匹配,吸收损耗更多微波,明显增强功能集料和功能砂浆的微波吸收能力,提高其微波辐照温升。

关键词: 微波吸收; 多孔集料; 微波辐照温升; 强度

中图分类号: TB34; TU528.01 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.015

Preparation and Properties of Porous Microwave Absorption Functional Aggregate

WANG Zhi¹, HE Jian¹, WANG Ziyi², LIANG Shuzhe¹, LIU Zhenhua¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The microwave absorption properties of porous microwave absorption functional aggregate and mortar prepared by template sintering were studied by using shale, organic matter(rice) and Mn-Zn ferrite. The results show that in this system, the porous microwave absorption functional aggregate with controllable pore structure and compressive strength of 6.5 MPa can be prepared after sintering at 1 000 ℃ for 30 min. When the pore diameter is 245–833 μm and the content of organic matter is 25%, the temperature rise of functional aggregate and functional mortar irradiated by microwave for 30 s is the highest, which can rise from room temperature to 218.8 ℃ and 119.4 ℃ respectively, and the melting time of functional mortar is 48.5 s. The porous structure can improve the impedance match between functional aggregate and free space, absorb more microwave, significantly enhance the microwave absorption capacity of functional aggregate and functional mortar, and increase the temperature rise of microwave irradiation.

Key words: microwave absorption; porous aggregate; temperature rise of microwave irradiation; strength

路面积雪是冬季交通事故的主要诱因之一,特别在中国西北、东北大多数城市,此类交通事故尤为严重。积雪使车轮与路面摩擦力减小,冰雪层路面摩擦系数仅为正常路面的20%~30%^[1-2],极易诱发事故。因此,如何及时有效地去除路面冰雪,对于确保道路安全通行具有重要意义。传统的除冰方法主要有机械、加热、融雪剂等,但存在能耗高^[3]、造价

高^[4]、损害混凝土路面^[5]等问题,而微波除冰法因其高效率和融雪除冰彻底的优点正受到越来越多的关注^[6-9]。

普通路面微波吸收能力弱,除冰效率低。在混凝土中加入碳纤维^[6]、钢纤维^[7]、石墨^[8]、高氧化铁粉煤灰^[9]等微波吸收功能相,能提高混凝土微波吸收能力,提高微波除冰效率,但存在分散不均、力学强

收稿日期:2019-08-12; 修订日期:2020-01-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51461135005)

第一作者:王智(1968—),男,重庆开州人,重庆大学教授,博士生导师,博士。E-mail:cquwangzhi@126.com

度降低、相容性差^[10]等问题.直接加入功能相的方式使功能相仅存于胶凝材料结构中,体积占比小,微波发热能力受限.集料在混凝土中的体积占比可达 70%~80%,远高于胶凝材料占比.普通集料密实无孔,而多孔结构能在吸波材料中改善材料与自由空间的阻抗匹配,减小材料对电磁波的反射,且孔结构对电磁波存在反射、干涉、散射等衰减作用^[11-13],有助于吸波材料对电磁波的吸收.在多孔陶粒^[14]、多孔碳材料^[15]、多孔混凝土^[16]、发泡型聚苯乙烯(EPS)为填充制备的水泥基复合多孔材料^[17]中,多孔结构能显著降低材料反射率,增加有效带宽,提高其吸波性能.若使用多孔微波吸收功能集料替换普通集料,将极大提高混凝土微波发热效率,而采用有机物作为模板,通过模板法烧结方式,可在适宜烧结制度下制备出孔结构可控的功能集料.另外,铁氧体对电磁波的损耗以磁损耗型为主,电损耗型为辅,是少有的兼具 2 种损耗方式的吸波功能相,除了常用于制备吸波材料之外,也可用于制备道路工程材料,如用以提高沥青混

凝土的自愈速率等^[18-20].
鉴于此,本文采用有机物(米粒)为模板,与页岩、锰锌铁氧体混合;同时为使孔结构可控,采用缓慢升温烧结的方式,通过变化烧结制度制备出孔径可控的微波吸收功能集料,初步研究功能集料孔结构对其微波吸收性能的影响.

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

页岩取自重庆沙坪坝,粉磨后过 150 μm 筛;水泥为重庆小南海牌 P·O 42.5R 普通硅酸盐水泥,页岩和水泥的化学组成¹⁾见表 1;市售锰锌铁氧体,其电磁参数见图 1,其中 $\tan \delta_m$ 为损耗角正切值,用以评价材料对微波损耗能力的强弱,该值越大,微波吸收损耗能力越强,微波发热能力越强;有机物为米粒,经破碎、筛分成 5 种粒径范围: $d < 75 \mu\text{m}$ 、 $d = 75 \sim 106 \mu\text{m}$ 、 $d = 106 \sim 150 \mu\text{m}$ 、 $d = 150 \sim 245 \mu\text{m}$ 、 $d = 245 \sim 833 \mu\text{m}$,其元素含量见表 2.

表 1 页岩和水泥的化学组成
Table 1 Chemical compositions of shale and cement $w/\%$

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	SO ₃	IL	Other
Shale	56.77	15.61	5.56	3.34	2.99	2.72	0.81	0.76	0.55	10.45	0.44
Cement	19.05	2.89	2.89	64.83	0.87	0.92	—	0.96	2.67	1.65	—

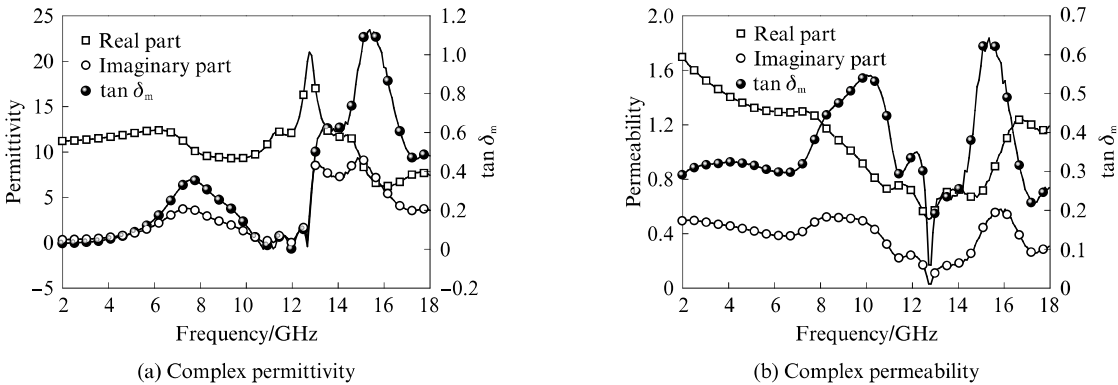


图 1 锰锌铁氧体的复介电常数和复磁导率曲线

Fig. 1 Complex permittivity and complex permeability of manganese-zinc ferrite

表 2 有机物(米粒)的元素含量
Table 2 Element content of organic material(rice) $w/\%$

C	O	H	N	S
40.35	51.62	6.79	1.13	0.11

1.2 试验方法

1.2.1 多孔微波吸收功能集料的制备与基本性能

微波吸收功能集料按页岩 50%、米粒 20%、锰

锌铁氧体 30%的配合比混合;水固比为 0.25. 按此配合比分别制备 20 mm×20 mm×20 mm 的试块和直径 10 mm 的料球,于(105±5)℃下干燥 2 h 后放入高温炉中,按预定的烧结制度煅烧,取出后冷却至室温待用.另外,为表征生料的热性能,对其进行热重-差示(TG-DSC)扫描量热法分析.

采用经过煅烧的 20 mm×20 mm×20 mm 功能

1)本文涉及的组成、含量、比值等除特别指明外均为质量分数或质量比.

集料试块,将其表面磨平后用于表观密度 ρ 及抗压强度 f_{cu} 测量;吸水率 w_w 参考 GB/T 17431.2—2010《轻集料及其试验方法第二部分:轻集料试验方法》测试;平均孔径采用数字显微镜与 Image Pro Plus 软件在 0.5 cm^2 范围选取 200 个孔结构进行测量. 功能集料试块孔隙率 p 按式(1)计算.

$$p = (1 - \frac{\rho_0}{\rho}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: ρ_0 为功能集料试块密度; ρ 为功能集料试块表观密度.

1.2.2 多孔微波吸收功能集料和功能砂浆的微波吸收性能

将煅烧后的料球破碎成小于 4.75 mm 的颗粒,按质量比 $2:1$,水灰比 0.6 与普通硅酸盐水泥混合,制成微波吸收功能砂浆,然后将其成型为上直径 50 mm 、下直径 60 mm 、高 40 mm 的圆台状功能砂浆试件;在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 标准养护室内养护 24 h 后,拆模置于室内环境养护 7 d ,测试前将试件置于 $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$ 烘箱内烘至恒重.

使用 850 W 微波炉加热功能集料试块和功能砂浆试件,并采用 FLIR T540 红外热像仪测试两者表面温度 T_s . 另外,将功能砂浆试件放入纸杯中,加入 1 cm 深的水后在 -20°C 环境下冻结,再使用 850 W 微波炉加热,以冰层从试件表面滑落的时间定为融冰时间 t_R . 功能砂浆试件的反射率依据 GJB 2038A—2011《雷达吸波材料反射率测试方法》,使用弓形法利用 HP8722ES 网络分析仪测试,测试范围为 $2 \sim 18\text{ GHz}$.

1.2.3 微波吸收功能砂浆试件的强度

按上节配比成型尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 的棱柱体功能砂浆试件,置于 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 标准养护室内养护 24 h 后,拆模置于室内环境养护 28 d . 参考 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法 (IOS 法)》,测试棱柱体功能砂浆试件的 28 d 抗折强度 f_t 和抗压强度 f_{cu} .

2 结果与讨论

2.1 微波吸收功能集料的烧结制度

图 2 为空气气氛下,从室温升至 1200°C ,升温速率为 $15^\circ\text{C}/\text{min}$ 的原材料生料 TG-DSC 图. 由图 2 可见:生料的 TG 曲线在室温 $\sim 200^\circ\text{C}$ 区间有 1.98% 的失重,DSC 曲线有一个吸热峰,此处为自由水和部分有机物的挥发; $200 \sim 400^\circ\text{C}$ 区间 TG 曲线有 11.82% 的失重,DSC 曲线有一个较强的放热峰,此处为剩余大量有机物(米粒)的挥发; $400 \sim 700^\circ\text{C}$ 区间

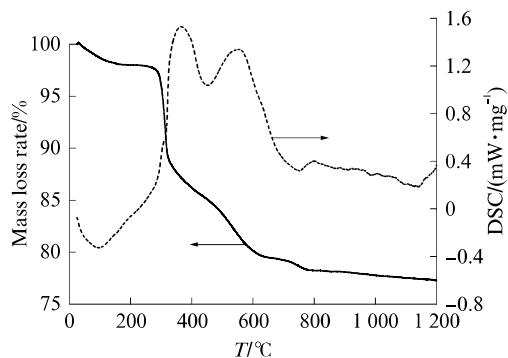


图 2 原材料生料的 TG-DSC 曲线

Fig. 2 TG-DSC curves of raw material

TG 曲线有 6.97% 的失重,对应的 DSC 曲线有一个较强的放热峰,此时为生料反应脱去氢氧根;高温阶段 ($800 \sim 1200^\circ\text{C}$) 的质量损失为 0.95% .

微波吸收功能集料烧结制度为:先逐步缓慢升温至烧结温度,然后保温一定时间,再缓慢冷却至室温,从而使制备的功能集料孔结构与有机物的颗粒性质有较好的一致性. 根据热分析结果,有机物从 300°C 开始质量损失速率加快,对应有一个明显的放热峰,此时有机物大量分解. 因此,初定预烧温度为 300°C ,预烧时间为 20 min . 烧结温度与保温时间是孔结构是否能保持完整且相对高强的关键因素,因此此处重点探究烧结温度和保温时间对功能集料性能的影响. 初步确定的烧结制度如图 3 所示. 使用粒径为 $150 \sim 245\text{ }\mu\text{m}$ 的有机物,在空气气氛下以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至预烧温度 300°C ,恒温 20 min ;随后以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 $900 \sim 1100^\circ\text{C}$,保温 $20 \sim 60\text{ min}$,最后随炉冷却至室温.

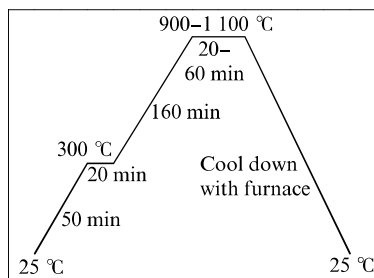


图 3 微波吸收功能集料烧结制度

Fig. 3 Sintering process of microwave absorption functional aggregate

2.1.1 烧结温度对微波吸收功能集料性能的影响

烧结温度会影响烧结过程中的液相量、孔结构、孔隙率等. 为了获得孔结构可控且性能最优的微波吸收功能集料,初步确定保温时间为 30 min ,讨论 5

种煅烧温度(900、950、1 000、1 050、1 100 °C)对功能集料性能的影响。

图4为烧结温度对功能集料试块基本性能的影响。由图4可见:随着温度升高,功能集料试块的表观密度和抗压强度上升、吸水率降低,这是由于随着温度升高,功能集料中液相的量越来越多,孔被液相填充,使整个结构越来越致密。采用模板法烧结制备功能集料,目的是通过改变加入的模板(米粒)粒径和掺量,使其孔结构可控。图4(c)为烧结温度对功

能集料试块平均孔径的影响,其中的有机物粒径 d 为150~245 μm ,因此得到的相应孔结构孔径也应为150~245 μm 。由图4(c)可知,5种烧结温度制备出的功能集料试块孔结构平均孔径均在此范围中,但温度越高产生的液相越多,这些液相会占据孔结构空位,使功能集料试块发生收缩变形,而孔径越小,越不利于孔结构调控。因此,出于强度高且孔结构可控考虑,选择1 000 °C的烧结温度进行后续研究。

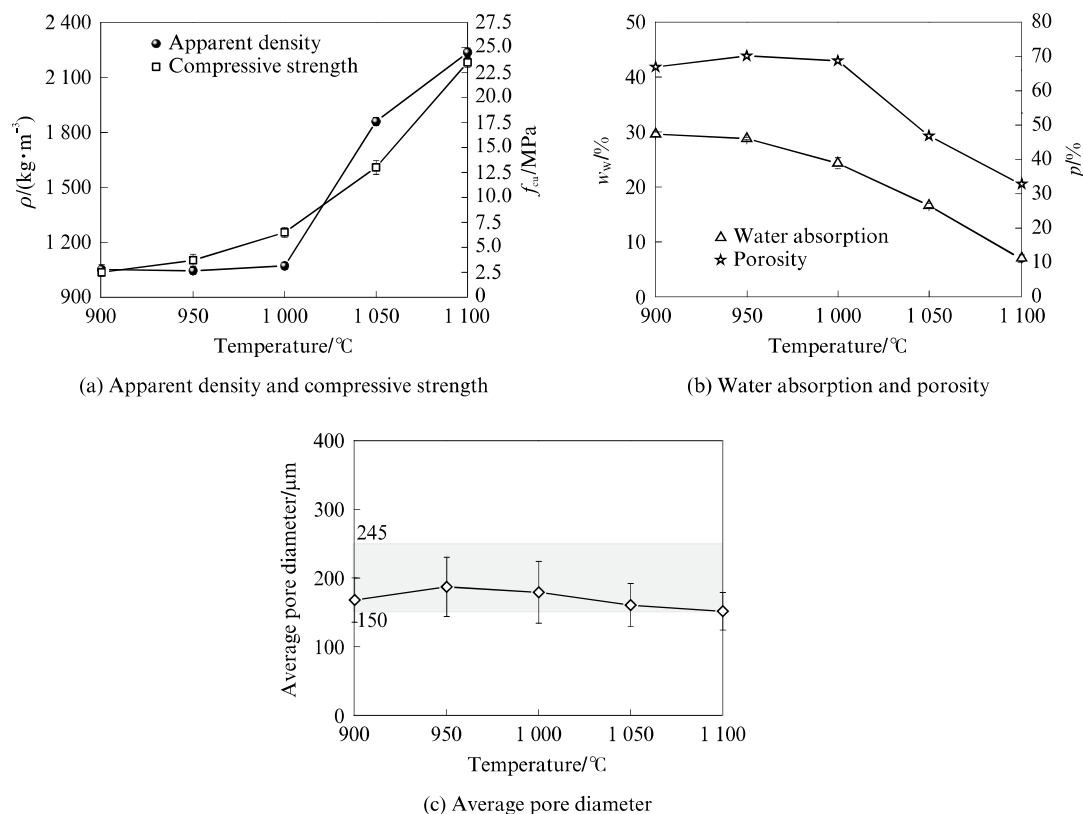


图4 烧结温度对微波吸收功能集料基本性能的影响

Fig. 4 Effect of sintering temperature on basic properties of microwave absorption functional aggregate

2.1.2 保温时间对微波吸收功能集料性能的影响

确定烧结温度为1 000 °C,设置保温时间 t_H 分别为20、30、40、50、60 min,测试保温时间对微波吸收功能集料各项性能的影响,结果见图5。由图5可见:随着保温时间的增加,功能集料试块的表观密度和抗压强度逐渐增大、吸水率逐渐减小。这是因为保温时间越长,出现的液相会越多地填充于孔结构,使功能集料试块愈加密实,试块收缩;保温时间为30 min时,液相产生量很少,尚不足以对试块孔结构产生影响,且试块在1 100 °C下保温60 min后,经检测其中仍含有铁氧体晶相并具有相应的电磁性能,所以确定保温时间为30 min,此时功能集料试块的抗压强度可达6.5 MPa。图6为

在1 000 °C下保温30 min制备出的功能集料试块和料球形状。

2.2 孔结构对功能集料基本性能影响

2.2.1 孔径对微波吸收功能集料基本性能影响

确定烧结温度为1 000 °C,保温时间为30 min,在此烧结制度下分别采用5种粒径有机物进行烧结(所得到的功能集料试块孔径也在相应粒径范围),测试功能集料试块基本性能,结果见图7。由图7可知:随着孔径 d 的增大,功能集料试块的表观密度和孔隙率变化不大,抗压强度减小而吸水率增大,说明在功能集料试块中,小粒径有机物形成的大连通孔少于大粒径有机物形成的大连通孔,闭孔增加,利于其抗压强度增大。

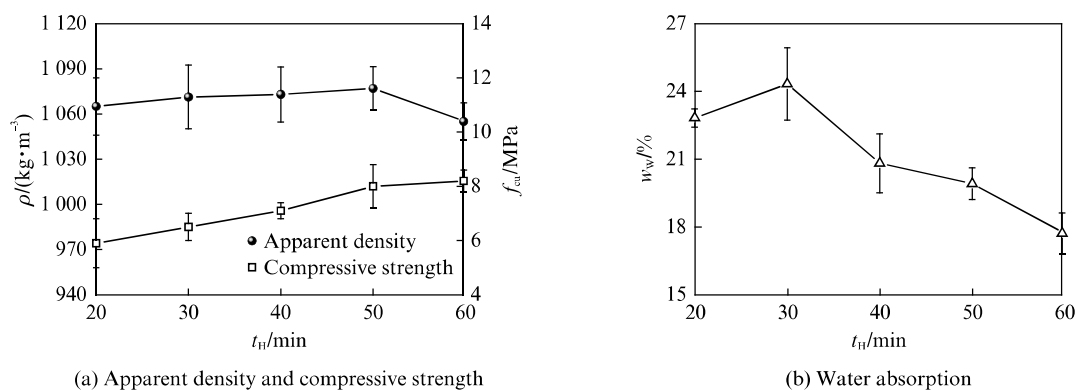


图5 保温时间对微波吸收功能集料基本性能的影响

Fig. 5 Effect of holding time on basic properties of microwave absorption functional aggregate

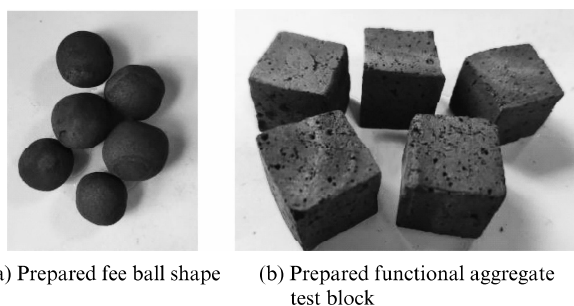


图6 所制备的功能集料试块和料球形状

Fig. 6 Prepared functional aggregate test block and ball shape

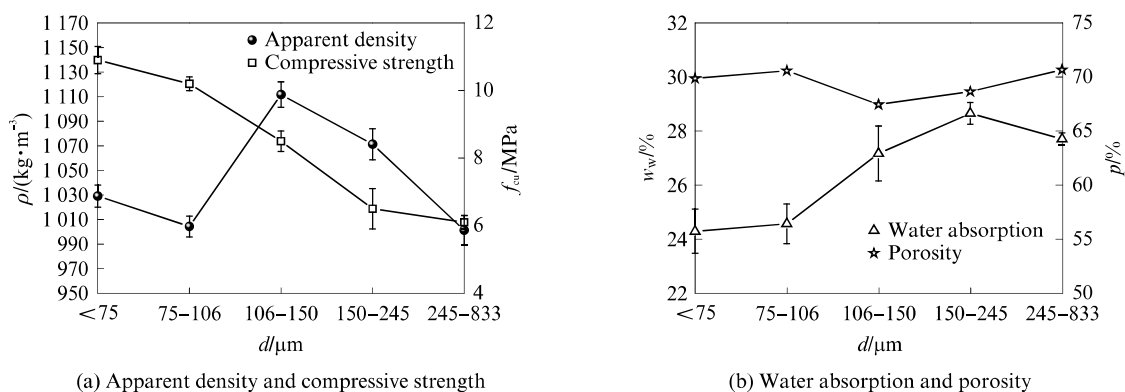


图7 平均孔径大小对微波吸收功能集料基本性能的影响

Fig. 7 Effect of average pore diameter on basic properties of microwave absorption functional aggregate

2.2.2 孔径对功能集料和功能砂浆性能的影响

将功能集料试块和砂浆试件放入 850 W 微波炉中加热 30 s, 用红外热像仪记录两者的表面温升 T_s , 结果见图 8.

由图 8(a) 可见: 孔径差异带来的温升差异非常大, 孔径 245~833 μm 的功能集料试块温升最快, 30 s 即从室温升至 200.6 $^{\circ}\text{C}$; 孔径小于 75 μm 的功能集料试块, 30 s 仅从室温升至 96.1 $^{\circ}\text{C}$, 温度最低,

两者相差约 104 $^{\circ}\text{C}$. 随着表面温度升高, 功能集料试块的温升速率逐渐降低, 例如孔径 245~833 μm 的功能集料, 前 10 s 温升速率为 6.91 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 最后 10 s 温升速率为 6.01 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 这是锰锌铁氧体的吸波能力随温度升高而衰减所致.

由图 8(b) 可见: 用标准砂制备的普通砂浆试件在接收 30 s 微波辐照后, 其表面温度仅从室温 20 $^{\circ}\text{C}$ 升至 45 $^{\circ}\text{C}$, 升温速率为 0.83 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 这是因为普通砂

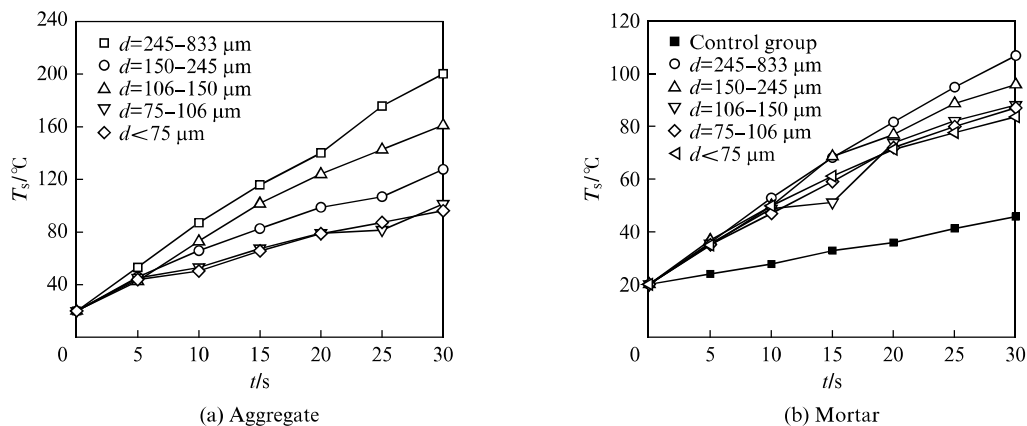


图 8 不同孔径功能集料试块及砂浆试件的表面温度随时间变化

Fig. 8 Variation of surface temperature of functional aggregate and mortar specimen of different pore diameters with time

浆对微波的吸收主要是水泥石内部存在的少量金属氧化物及结晶水引起的介电损耗^[9],但含量太少,所以微波辐照后其表面温度依然很低;5组功能砂浆试件的表面温度均远超过普通砂浆试件的表面温度,但不及功能集料试块的效果显著,这是因功能集料和水泥石两者温升差异太大,而砂浆中的功能集料被水泥石隔断和包裹,从而使其热量传播受阻,增大了功能集料与自由空间波阻抗的差异,使部分电磁波反射所造成的.但功能砂浆试件的温升情况与功能集料试块相符,孔径 $245\sim833\ \mu\text{m}$ 试件的表面温度最高,30 s 即从室温升至 $107.06\ ^{\circ}\text{C}$.

图 9 为功能砂浆试件与普通砂浆试件在 $2\sim18\ \text{GHz}$ 的反射率.可以看出:普通砂浆试件的反射率曲线十分平缓,无明显吸收峰且数值均未超过 $-10\ \text{dB}$,可以认为普通砂浆对电磁波的吸收能力非常弱;功能砂浆试件在 $2\sim18\ \text{GHz}$ 内都存在非常明显的吸收峰,且吸收峰波动规律出现,这说明其中的孔结构改善了功能砂浆与自由空间的阻抗匹配,使自由空间与砂浆之间形成了良好的连通性^[20],更多电磁波谱进入砂浆内部,产生损耗.孔径越大,功能砂浆与自由空间的阻抗差异越小,电磁波反射越少,电磁波损耗越多,由此产生的热量越多,表面温度越高.孔径 $245\sim833\ \mu\text{m}$ 的功能砂浆试件吸收能力最佳,反射率低于 $-10\ \text{dB}$ 的有效频宽为 $6.38\ \text{GHz}$, $3.08\ \text{GHz}$ 处反射率最低,为 $-29.66\ \text{dB}$,因此选择 $245\sim833\ \mu\text{m}$ 粒径范围有机物进行后续研究.

2.2.3 有机物掺量对微波吸收功能集料基本性能的影响

选用微波吸收效果最好的粒径为 $245\sim833\ \mu\text{m}$ 的有机物,以掺量 (w_{rice}) 分别为 0% 、 5% 、 10% 、

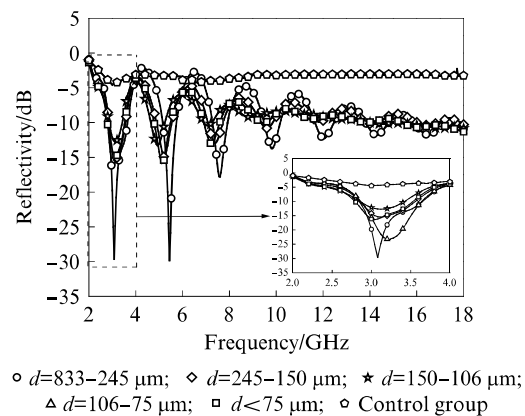


图 9 不同孔径功能砂浆试件的反射率随频率变化

Fig. 9 Variation of reflectivity of functional mortar specimen of different pore diameters with frequency

15% 、 20% 、 25% 混入生料中,煅烧出的功能集料基本性能如图 10 所示.由图 10 可见:随着有机物掺量增多,功能集料的孔隙率增大,说明此时团聚的有机物形成了更多连通孔,导致其抗压强度和表观密度大幅下降,吸水率明显增加;当有机物掺量为 0% 时,功能集料的孔隙率为 47% ,这是生料内部水分和有机物挥发,以及页岩含有的 Fe_2O_3 发生还原反应生成 CO_2 气体而形成的细微小孔,而本试验为了使功能集料的孔结构可控,采用的烧结制度尚不能使其产生充分液相来填充这些微孔使结构密实,因此这一孔隙率偏大.对比功能集料的吸水率与孔隙率可知,当有机物掺量为 0% 时,功能集料的闭孔率为 36.65% ,而当有机物掺量为 25% 时,功能集料的闭孔率为 45.07% ,闭孔率增幅小于吸水率增幅,说明有机物掺量增加会使功能集料内部产生更多连通孔,这也使高有机物掺量下的功能集料抗压强度大幅下降.

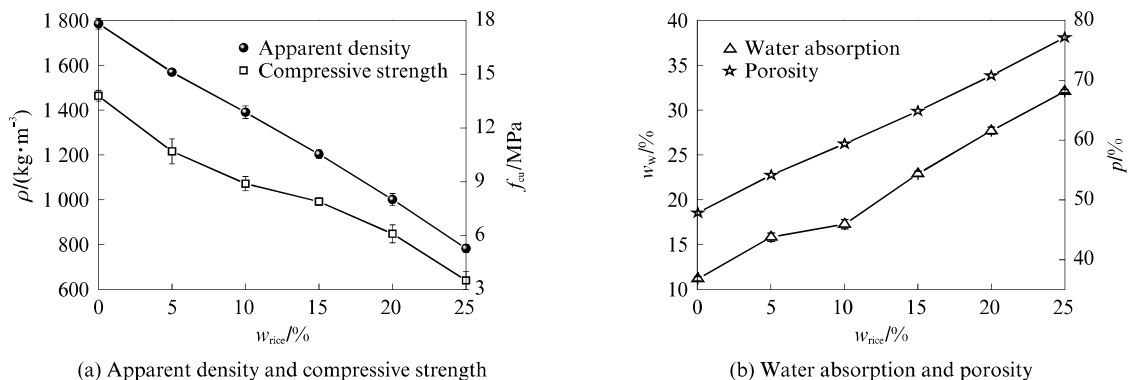


图 10 有机物掺量对微波吸收功能集料基本性能的影响

Fig. 10 Effect of organic material content on basic properties of microwave absorption functional aggregate

2.2.4 有机物掺量对功能集料和功能砂浆性能的影响

将由不同掺量有机物烧制出来的功能集料料球

和功能砂浆试件烘干冷却后放入 850 W 微波炉中加热 30 s, 用红外热像仪记录两者的表面温升 T_s , 结果见图 11.

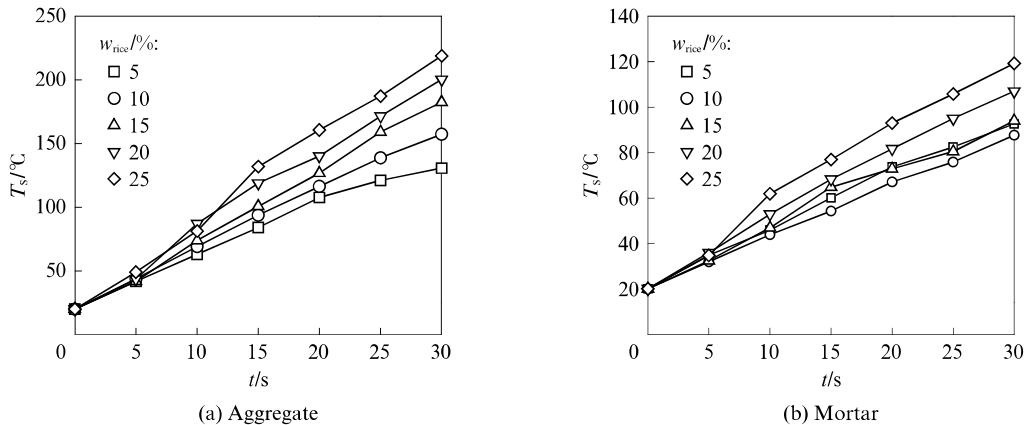


图 11 不同有机物掺量微波吸收功能集料料球和砂浆试件的表面温度随时间变化

Fig. 11 Variation of surface temperature of functional aggregate ball and mortar specimen adding different contents of organic material with time

由图 11(a)可见:随着有机物掺量增加,经过 30 s 微波辐照后的功能集料料球表面温度升高,且最高为有机物掺量为 25% 时,此时其表面温度为 218.8 °C. 这是由于随着有机物掺量增加,集料内部大孔增加,利于集料与空气介质阻抗匹配,吸收更多电磁波;孔结构增多使电磁波在孔隙内部的反射、散射、干涉增多,导致能量损失增加,共同作用导致经过微波辐照后的功能集料料球表面温度随孔结构增多而升高.

由图 11(b)可知:由有机物掺量为 25% 的功能集料料球所制备出的功能砂浆试件表面温度最高,为 119.4 °C,这是在此有机物掺量下功能集料的温升最快所致. 但功能集料料球与功能砂浆试件的表面温度差异依然很大,这是由于水泥石的阻隔使微波吸收集料间传热困难,导致功能砂浆试件表面温

度无法达到功能集料料球表面温度. 因此,在提高集料微波吸收能力的同时也应提高水泥石的微波吸收能力,才能有效提高整个体系的微波吸收能力.

图 12 为有机物掺量对功能砂浆试件融冰时间的影响. 实际工程中,环境温度与冰层、路面材料的温度一致,所以本试验中 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 即为冰层与砂浆的初始温度. 由图 12 可知,采用未掺有机物的集料制备的砂浆试件融冰时间为 128.2 s;功能砂浆试件中的有机物掺量越多,其孔结构越多,融冰时间越短,最短用时 48.5 s,与前者相比下降 62.2%. 将砂浆试件的融冰时间与表面温度结合起来看,显然,砂浆表面温度越高,融冰时间越短. 由于试验时是将砂浆试件侧放入微波炉中,记录冰层从砂浆表面滑落用时的,而实际工程中采用微波发射板与机械除冰相结合,在冰层与砂浆表面之间的界面融化之后,再采

用机械破碎并分离,因此在实际工程操作过程中,融冰时间更短。

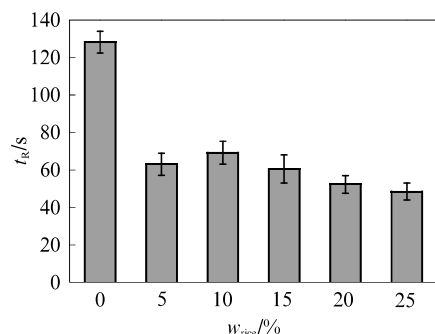


图12 有机物掺量对功能砂浆融冰时间的影响

Fig. 12 Effect of organic material content on deicing time of microwave absorption function mortar

2.2.5 有机物掺量对功能砂浆强度的影响

图13是有机物掺量不同时,功能砂浆试件的28 d抗折强度 f_t 和抗压强度 f_{cu} 。由图13可见,功能砂浆的强度基本上随着有机物掺量增加而降低,这是由于功能集料中孔隙增加且其中所含的硅铝矿物并未产生大量玻璃体与莫来石晶体,因此功能集料强度随有机物掺量增加而下降,从而导致功能砂浆强度随之降低。由图13还可看出,当有机物掺量大于15%后,功能砂浆的抗压强度下降速率增大。这是由于有机物掺量小于15%时,大部分有机物在集料内部形成独立的闭孔,但当有机物掺量达15%后,有机物团聚产生大量连通孔,导致功能集料强度大幅下降,受此影响,功能砂浆的抗压强度也大幅降低。

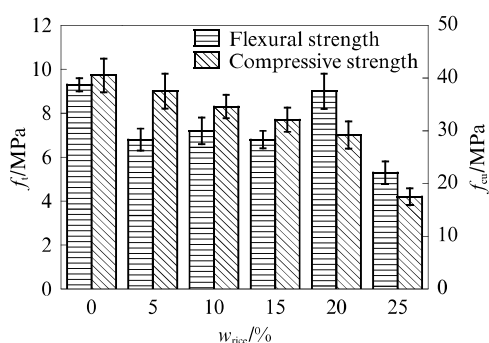


图13 有机物掺量不同的功能砂浆28 d抗折强度和抗压强度

Fig. 13 Flexural strength and compressive strength at 28 d of functional mortar with different organic material contents

本试验根据集料微波吸收功能化的思路,采用模板法烧结制备了多孔微波吸收功能集料,测试了其基本性能及微波吸收性能。但由于本试验侧重于

孔结构对集料微波吸收性能的影响,因此采用的烧结制度未使集料产生过多液相,导致其强度相对较低。但本文主要致力于提高水泥基材料的微波吸收能力,因此利用集料来提高水泥基材料微波吸收能力的思路仍然可行。

3 结论

(1)采用有机物作为模板在集料中起“占位”作用,待烧结后有机物挥发,产生“空位”。可以选用合适的烧结制度,通过改变集料中的有机物掺量及其粒径来得到可控孔结构。本试验中烧结温度为1 000℃,保温时间为30 min。

(2)集料中锰锌铁氧体赋予集料微波吸收功能,孔结构改善了功能集料与自由空间的阻抗匹配,能吸收损耗更多微波,使功能集料的微波吸收能力进一步得到提升。本试验有机物粒径为245~833 μm、掺量为25%的功能集料球温升最高,经过30 s微波辐照后即可从室温升至218.8℃。

(3)微波吸收功能砂浆的微波吸收能力显著提高,当有机物粒径为245~833 μm、掺量为25%时,经过30 s微波辐照后,功能砂浆的表面温度即可从室温升至119.4℃,融冰时间为48.5 s,28 d抗折强度满足路用要求,但其温升低于同孔径集料,原因是砂浆中的水泥石阻隔了热量传递,影响了整体升温效果。

参考文献:

- [1] HANNEMAN R L. Highway salt: Bargain of the century [C]//8th World Salt Symposium. Holand: [s. n.], 2000: 759-765.
- [2] THORNES J E. UK road salting: An international benefit cost review [J]. Highways and Transportation, 1999, 46 (7/8): 22-24.
- [3] 黎聪,刘宗战,张春晖,等.国内路面冰雪清除技术的现状及发展趋势[J].机械制造与自动化,2014(4):68-70.
LI Cong, LIU Zongzhan, ZHANG Chunhui, et al. Current status and development trend of domestic road ice and snow removal technology [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(4): 68-70. (in Chinese)
- [4] PAN P, WU S, XIAO Y, et al. A review on hydronic asphalt pavement for energy harvesting and snow melting[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 48: 624-634.
- [5] ÖZGAN E, SERIN S, GERENGI H, et al. Multi-faceted investigation of the effect of de-icer chemicals on the engineering properties of asphalt concrete [J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 87: 59-67.
- [6] WANG Z J, GAO J, AI T, et al. Laboratory investigation on microwave deicing function of micro-surfacing asphalt mixture

- reinforced by carbon fiber[J]. *Journal of Test Evaluation*, 2014, 42(2):301.
- [7] LIU Q, YU W, SCHLANGEN E, et al. Unravelling porous asphalt concrete with induction heating[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 71:152-157.
- [8] 邱静静, 关博文, 丁冬海, 等. 掺石墨水泥基复合材料电磁波吸收性能研究[J]. *华东交通大学学报*, 2015, 32(3):103-107.
- QIU Jingjing, GUAN Bowen, DING Donghai, et al. Electromagnetic wave absorption properties of graphite-based cementitious composites[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2015, 32(3):103-107. (in Chinese)
- [9] 王子仪. 磁选粉煤灰制备电磁功能集料与砂浆性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2018.
- WANG Ziyi. Study on electromagnetic functional aggregate and mortar performance of magnetic separation fly ash[D]. Chongqing:Chongqing University, 2018. (in Chinese)
- [10] KONG Y, WANG P, LIU S, et al. Hydration and microstructure of cement-based materials under microwave curing[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 114:831-838.
- [11] 朱新文, 江东亮, 谭寿洪. 碳化硅网眼多孔陶瓷的微波吸收特性[J]. *无机材料学报*, 2002, 17(6):1153-1156.
- ZHU Xinwen, JIANG Dongliang, TAN Shouhong. Microwave absorption properties of silicon carbide mesh porous ceramics [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2002, 17(6):1153-1156. (in Chinese)
- [12] ZHANG H T, ZHANG J S, ZHANG H Y. Computation of radar absorbing silicon carbide foams and their silica matrix composites [J]. *Computational Materials Science*, 2007, 38(4):857-864.
- [13] KIM S S, KIM S T, AHN J M, et al. Magnetic and microwave absorbing properties of Co-Fe thin films plated on hollow ceramic microspheres of low density[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, 271(1):39-45.
- [14] 何永佳, 肖培浩, 肖静, 等. 吸附钡铁氧体的多孔陶粒吸波材料制备及其性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2017, 35(6):861-865.
- HE Yongjia, XIAO Peihao, XIAO Jing, et al. Preparation and properties of porous ceramsite absorbing materials adsorbing barium ferrite[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2017, 35(6):861-865. (in Chinese)
- [15] FANG J, LIU T, CHEN Z, et al. A wormhole-like porous carbon/magnetic particles composite as an efficient broad band electromagnetic wave absorber[J]. *Nanoscale*, 2016, 10:1039.
- [16] 梁丽敏, 余红发, 吴庆令, 等. 多孔混凝土的吸波特性[J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(2):165-168.
- LIANG Limin, YU Hongfa, WU Qingling, et al. Absorbing properties of porous concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(2):165-168. (in Chinese)
- [17] 赵彦波, 刘顺华, 管洪涛. 水泥基多孔复合材料吸波性能[J]. *硅酸盐学报*, 2006, 34(2):225-228.
- ZHAO Yanbo, LIU Shunhua, GUAN Hongtao. Absorbing properties of cement-based porous composites[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2006, 34(2):225-228. (in Chinese)
- [18] ZHAO H D, ZHONG S, ZHU X Y, et al. High-efficiency heating characteristics of ferrite -filled asphalt-based composites under microwave irradiation[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(6):04017007-1-13.
- [19] ZHU X Y, CAI Y S, ZHONG S, et al. Self-healing efficiency of ferrite-filled asphalt-based composites after microwave irradiation[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 141(15):12-22.
- [20] 刘顺华, 刘军明, 董星龙, 等. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京:化学工业出版社, 2007.
- LIU Shunhua, LIU Junming, DONG Xinglong, et al. Electromagnetic wave shielding and absorbing materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007. (in Chinese)