

文章编号:1007-9629(2025)02-0184-09

水热固化工艺对固废基人造碎石性能的影响

洪寅哲¹, 孔纲强^{1,*}, 陈永辉¹, 褚莉花², 罗杰³

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 湖州市公路与运输管理中心, 浙江 湖州 313099; 3. 浙江湖杭高速公路有限公司, 浙江 杭州 313019)

摘要:以工程渣土、电石渣和脱硫石膏等固废为原料,利用水热固化技术制备固废基人造石材,探究水热固化条件对固废基人造石材力学性能和微观孔隙结构的影响规律;开展固废基人造石材的碎石化生产工艺试验,测定并分析了人造碎石与天然碎石物理性能的异同点.结果表明:固废基人造石材的抗压强度随着反应温度 and 时间的提升先增大、后减小,并随着成型干密度的增大和过筛最大粒径的减小而降低;湿土制样试件因物料结合接触面积不均,水热固化反应不够充分,其抗压强度低于干土制样试件;碎石生产工艺下,固废基人造碎石的吸水率约为 21.2%,为天然碎石的 4.7 倍,压碎性指标约为 27.1%,为天然碎石的 3.8 倍.

关键词:工程渣土;电石渣;水热固化;人造碎石;低场核磁共振

中图分类号: TU526

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2025.02.012

Influence of Hydrothermal Curing Process on the Properties of Solid Waste Based Artificial Crushed Stone

HONG Yinzhe¹, KONG Gangqiang^{1,*}, CHEN Yonghui¹, CHU Lihua², LUO Jie³

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Huzhou Highway and Transportation Management Center, Huzhou 313099, China; 3. Zhejiang Huhang Expressway Co., Ltd., Hangzhou 313019, China)

Abstract : Using solid waste such as engineering musk, carbide slag, and desulfurization gypsum as raw materials, the solid-waste based artificial crushed stone was prepared through hydrothermal curing technology. The effect of hydrothermal curing conditions on the mechanical properties and microscopic pore structure of the artificial crushed stone was studied. Additionally, experiments on the crushed stone production process of the solid waste-based artificial crushed stone were conducted, and the physical properties of artificial crushed stone and natural crushed stone were measured and compared. The results showed that the compressive strength of the solid waste-based artificial crushed stone initially increased and then decreased with rising reaction temperature and time, while it decreased with increasing dry density and decreasing maximum particle size after sieving. Specimens prepared from wet soil exhibited lower compressive strength than those from dry soil due to uneven contact area and insufficient hydrothermal curing. Under the crushed stone production process, the water absorption rate of the solid waste-based artificial crushed stone was approximately 21.2%, 4.7 times that of natural crushed stone, and its crushing index was about 27.1%, 3.8 times that of natural crushed stone.

Key words: engineering muck; carbide slag; hydrothermal curing; artificial crushed stone; low-field NMR

收稿日期:2024-02-28;修订日期:2024-04-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178327)

第一作者:洪寅哲(1998—),男,江苏无锡人,河海大学硕士生.E-mail:hhhyz_08@163.com

通讯作者:孔纲强(1982—),男,浙江金华人,河海大学教授,博士生导师,博士.E-mail: gqkong1@163.com

碎石用途广泛,是建筑行业不可或缺的大宗建筑材料.但天然碎石的过度开采会导致自然环境的严重退化.鉴于此,相关学者对人造碎石开展研究,以期替代天然碎石,缓解碎石资源短缺的压力^[1].目前,制备人造碎石的工艺主要有高温烧结、冷粘结和水热固化等^[2],其中,高温烧结制备工艺所需能耗较大,且制备过程中会产生较多CO₂,不符合低碳理念;冷粘结工艺通过混合料中具有火山灰活性物质产生的水化反应^[3],使得骨料硬化,但所需养护时间较长,难以满足高效量产的需求.

水热固化工艺作为一种相对低碳环保的生产技术,可在相对低温(<200℃)的条件下进行,以饱和蒸汽压环境促进无机废弃物内部快速发生水化反应^[4].目前水热固化技术已被广泛应用于将各类无机废弃物合成新型建筑材料的工艺中.佟钰等^[5]利用水热固化技术将粉碎后的废弃混凝土与Ca(OH)₂和NaOH混合制备成高机械强度的块状制品.兰浩然等^[6]利用陶瓷废料的高硅特性,掺Ca(OH)₂以提供钙源,采用水热固化技术制备具有调湿性能的室内薄板材料.Zhu等^[7]通过水热固化技术将湿地底泥与生物炭混合制备生态护岸材料,并探究了其重金属吸附机理.孔纲强等^[8]以玄武岩粉末(BP)为原料,探究全固废基胶凝体系的再利用,并开展了水热固化制备人造石材的研究.

以湿土为原料利用水热固化技术制备人造碎石,是未来产业化量产必须面临的问题;然而,既有研究均将土样深度脱水后制样,因此对湿土制样下人造石材的力学性能和机理尚未深入探讨.鉴于此,本文旨在研究直接采用湿土制样水热固化技术制备人造石材的可行性,探究干、湿两种制样方式在不同制备条件下对人造石材力学性能的影响规律及微观机理,并开展碎石化生产试验,同时测定其相应物理指标,为人造碎石量产工艺提供技术参考.

1 材料与方法

1.1 试验原料

试验原料为工程渣土(EM)、电石渣粉末(CS)和脱硫石膏粉末(DG),均属于固体废弃物,其形貌如图1所示.试验选用的工程渣土取自江苏省苏州市阳澄湖镇,为阳澄湖镇风电桩基础施工开挖渣土;电石渣取自巩义市元亨净水材料厂,为浅灰色粉末;脱硫石膏取自浙江台州三门电厂,为浅黄色粉末.通过X射线荧光光谱仪(XRF)测定原料的化学组成(质量分数,文中涉及的组成、含量等除特别说明外均为质量分数),结果见表1.试验选用的工程渣土中SiO₂含量达64.9%,电石渣中CaO含量达90.9%,分别满足作为硅基材料和钙基材料的要求.

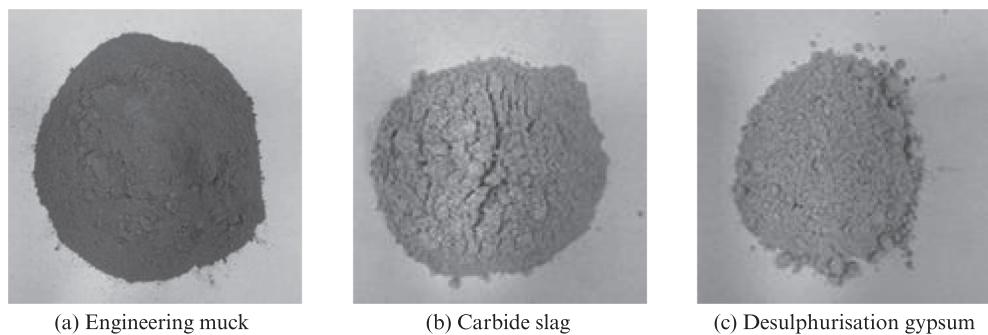


图1 试验原材料形貌
Fig. 1 Morphology of raw materials

表1 原材料的化学组成
Table 1 Chemical compositions (by mass) of raw materials

Material	Unit: %					
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
EM	64.9	2.0	19.4	5.5	2.7	0.3
CS	4.7	90.9	2.1	0.7	0.1	1.3
DG	2.3	49.3	0.5	0.4	0.5	45.4
BP ^[8]	48.2	9.2	14.3	15.0	4.5	1.3
CS ^[8]	3.8	94.4		0.2		0.3

1.2 试验内容

1.2.1 原料预处理

试验选用的工程渣土天然含水率为22%,需在

105℃下干燥24 h;电石渣和脱硫石膏的初始含水率较低,只需在105℃下干燥8 h.待各原料均烘至恒重(完全干燥状态)后,分别破碎成粉末状.随后对电石

渣粉末和脱硫石膏粉末过 0.5 mm 标准筛预处理,对干土粉末依次过 0.5、0.3、0.15、0.075 mm 标准筛预处理;对湿土颗粒过 2 mm 标准筛预处理。

1.2.2 水热固化

试验选用干土制样和湿土制样两种制样方式进行人造石材的制备。根据已有研究结果^[8],按 $m(\text{干土}):m(\text{电石渣}):m(\text{脱硫石膏})=1.00:0.60:0.08$ 配

制混合料。利用水泥胶砂搅拌机将原料进行充分混合,并分批加入一定量水形成浆料,控制浆料整体含水率 w 为 20%;通过 BJ-15 型粉末压片机制样,试样为尺寸 $\phi 20 \times 20$ mm 的圆柱体,控制成型干密度为 1.4、1.5、1.6、1.7、1.8、1.9 g/cm³。试样置于水热反应釜中分别在 100、120、160、200、240 °C 下水热固化 6、9、12、15、18 h,并于 80 °C 下干燥 10 h,具体试验工况见表 2。

表 2 基于固废的人造石材的试验工况
Table 2 Test conditions of solid waste based artificial stones

Specimen	Sample preparation method	Temperature/°C	Time/h	Moulding dry density/(g·cm ⁻³)	Sieved maximum particle size/mm
A-1	By dry soil	100, 120, 160, 200, 240	12	1.8	0.5
A-2	By wet soil				
B-1	By dry soil	200	6, 9, 12, 15, 18	1.8	0.5
B-2	By wet soil				
C-1	By dry soil	200	12	1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9	0.5
C-2	By wet soil				
D-1	By dry soil	200	12	1.8	0.075, 0.15, 0.3, 0.5
D-2	By wet soil				0.5

1.2.3 湿土制样的差异

不同于干土粉末的过筛处理,湿土受其初始含水率影响,难以通过孔径较小的标准筛,但将其与电石渣粉末、脱硫石膏粉末混合后,混合料整体含水率下降,可用 0.5 mm 标准筛进行过筛处理,测定过筛后混合料整体含水率,并加入一定量水,保证浆料整体含水率与干土制样一致($w=20\%$)。

1.3 测试方法

1.3.1 无侧限抗压强度测试

依据 DZ/T 0276.1—2015《岩石物理力学性质试验规程》,通过 CMT5205 型微机控制电子万能试验机测定人造石材的无侧限抗压强度。测试中加载速率设定为 1.0 mm/min,取 3 个平行样无侧限抗压强度的平均值作为试验结果。

1.3.2 低场核磁共振测试

采用真空饱水装置对试样进行 12 h 真空饱水,饱水后将试样浸泡在水中 24 h。采用 MicroMR20-025V 型低场核磁共振仪通过 CPMG 脉冲序列对人造石材内部孔隙结构进行表征,测试中磁场强度为 0.42 T,质子共振频率为 21 MHz。

目前,低场核磁共振技术已被广泛应用于土壤、岩石等内部孔隙分析,以孔隙水为探针,获得横向弛豫时间 T_2 与孔隙结构间的关系^[9-10]。为便于孔隙评价,根据相关研究对孔隙尺寸的划分方法,结合 T_2 分布曲线,将孔隙分为 4 类:小孔隙($T_2 \leq 0.5$ ms)、中孔隙($0.5 \text{ ms} < T_2 \leq 3 \text{ ms}$)、大孔隙($3 \text{ ms} < T_2 \leq 10 \text{ ms}$)

和超大孔隙($T_2 > 10 \text{ ms}$)^[11]。其中,小孔隙代表晶间孔隙和凝胶孔隙,而中孔隙、大孔隙和超大孔隙则代表材料内部填充度较差的孔隙。

2 结果与分析

2.1 水热反应时间对人造石材性能的影响

水热反应时间会影响水热固化生成水化产物的种类、形态和数量^[10]。由于水热反应生成的胶凝是人造石材的强度来源,因此水热反应时间对于人造石材的力学性能影响显著,其影响曲线如图 2 所示,图中 RLS 为模拟月壤。由图 2 可见:随着水热反应时间的增长,人造石材的抗压强度迅速增加,即水热反应时间从 6 h 增长到 12 h,干土制样和湿土制样两种方式下人造石材抗压强度分别增长了 67.1% 和 60.5%,并在 12 h 时达到峰值;当水热反应时间超过 12 h 后,人造石材的抗压强度开始降低。上述趋势与孔纲强等^[8]、Chen 等^[11]和 Cai 等^[12]的研究结论相近。

2.2 水热反应温度对人造石材性能的影响

水热反应温度对人造石材抗压强度的影响曲线如图 3 所示。由图 3 可见,随着水热反应温度的升高,人造石材的抗压强度迅速增长,反应温度为 200 °C 时抗压强度达到峰值,超过 200 °C 后抗压强度开始下降,这与孔纲强等^[8]、Chen 等^[11]、佟钰等^[13]的试验结果基本一致。同时,干土制样与湿土制样下人造石材抗压强度随水热反应温度升高的变化规律相近,从 100 °C 到 200 °C 两者抗压强度分别增长了 81.0% 和

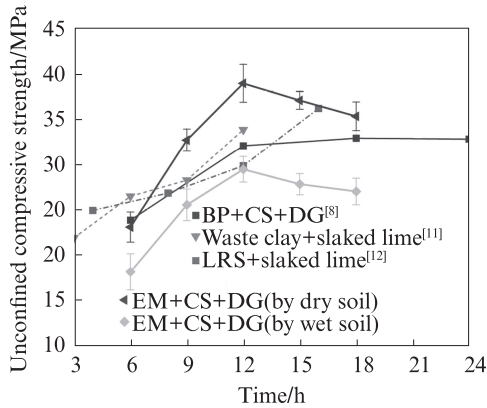


图2 水热反应时间对人造石材抗压强度的影响

Fig. 2 Effects of hydrothermal reaction time on compressive strength of artificial stone

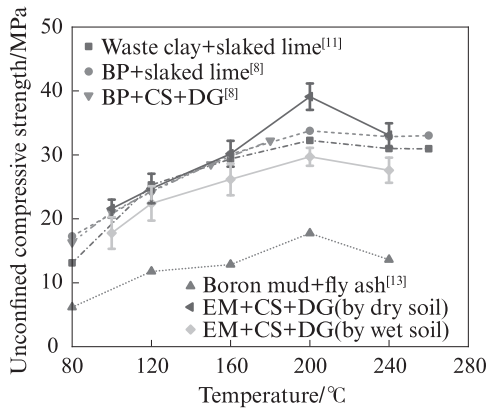


图3 水热反应温度对人造石材抗压强度的影响

Fig. 3 Effects of hydrothermal reaction temperature on compressive strength of artificial stone

66.9%。随着水热反应温度的升高,人造石材内部生成的水热产物类型和数量均会发生改变^[13-14],且在高温高压的养护条件下,生成的胶凝体更加稳定^[15],因此对材料的抗压强度提升会有显著影响,但过高的温度可能会使部分胶凝体发生分解,从而导致强度从200 °C后开始下降。

2.3 成型干密度对人造石材性能的影响

成型干密度对人造石材抗压强度的影响曲线如图4所示。由图4可见:随着成型干密度的增加,人造石材的抗压强度也随之增加;干土制样下人造石材的干密度从1.4 g/cm³增加到1.9 g/cm³时,材料的抗压强度也由16.3 MPa增加到43.0 MPa,提高了163.8%;湿土制样下人造石材的干密度从1.4 g/cm³增加到1.9 g/cm³时,其抗压强度由11.5 MPa增加到33.1 MPa,提高了187.8%。上述试验结论与Chen等^[11]的研究结果相吻合。

成型干密度反映了试样的压实程度,增大试样的成型干密度会促使混合料颗粒接触更加紧密,物

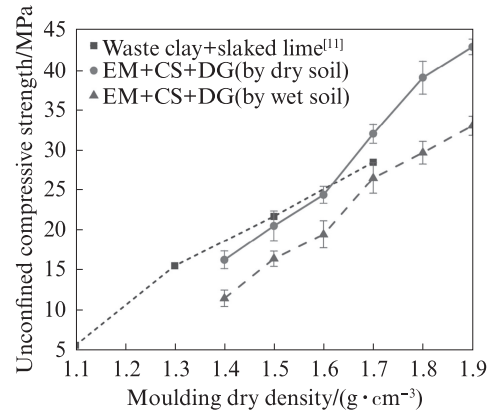
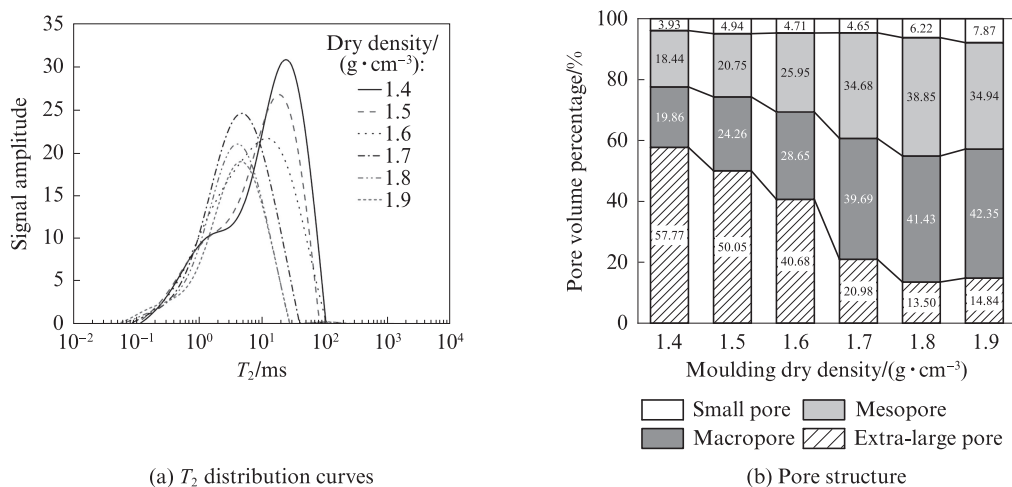


图4 成型干密度对人造石材抗压强度的影响

Fig. 4 Effects of moulding dry density on compressive strength of artificial stone

料颗粒间间隙更小,从而促进水热反应的进行。同时,水热反应生成的C-S-H凝胶与托勃莫来石晶体能更好地填充人造石材的内部孔隙,形成致密的结构,从而极大地提高材料强度。因此,可以认为增大材料初始的成型干密度可促进其水热反应后强度的提升。

干土制样下不同成型干密度人造石材的横向弛豫时间 T_2 分布曲线和孔隙分布如图5所示。由图5可见:(1)随着成型干密度的增加,材料的 T_2 曲线图谱向左发生偏移,即成型干密度由1.4 g/cm³增加到1.9 g/cm³时, T_2 曲线分布区间从0.12~102.00 ms左移到0.05~27.00 ms,同时峰面积也从1316.49减小至706.67。(2)不同成型干密度下 T_2 曲线对应的峰顶点不断降低,且对应的弛豫时间也发生不同程度的降低,这表明成型干密度的增加导致人造石材内部孔隙数量和尺寸均减小,结合图4中人造石材的无侧限抗压强度随成型干密度增加而增加的趋势,可以认为人造石材力学性能受其内部孔隙结构的显著影响。(3)人造石材成型干密度从1.4 g/cm³增加至1.9 g/cm³时,其超大孔隙的占比从57.77%降低至14.84%,而中孔隙和大孔隙的占比从38.60%增长至77.29%,表明成型干密度的增加会使先前的超大孔隙逐渐向中孔隙和大孔隙发展。(4)当人造石材的成型干密度从1.6 g/cm³增加至1.7 g/cm³时,其内部的超大孔隙占比降低幅度最大,这和材料的无侧限抗压强度规律一致。超大孔隙会对材料强度产生不利影响,其占比过多会导致材料强度过低。同时,成型干密度影响着材料的初始孔隙特征,并最终决定水热反应后材料内部孔隙的发展。

图5 不同成型干密度下人造石材的 T_2 分布曲线和孔隙结构Fig. 5 T_2 distribution curves and pore structure of artificial stone with different moulding dry densities

2.4 过筛最大粒径对人造石材性能的影响

原料过筛最大粒径对人造石材抗压强度的影响如图6所示.由图6可知,干土制样下人造石材试样的抗压强度从过筛最大粒径为0.5 mm时的39.1 MPa增长到过筛最大粒径为0.075 mm时的58.3 MPa,增长了49.1%.随着原料过筛最大粒径的减小,人造石材的抗压强度呈现上升趋势.过筛最大粒径表示原料混合料中材料颗粒通过标准筛的最大粒径,对混合料中材料粒径组成有着制约作用.相关文献^[16]表明,硅基材料的粒径过大会降低硅基材料的反应速率,影响水热反应产物的生成,同时材料的粒径大小也会影响水化硅酸钙(C-S-H)凝胶的形态变化.由于混合料粒径越小,其比表面积越大,各反应物物料间混合接触效果就越好,导致水热反应活性更强,因此可以认为减小原料过筛最大粒径会对水热反应进程有促进作用,促使混合料中更多的钙基材料与硅基材料发生反应,提升水热反应程

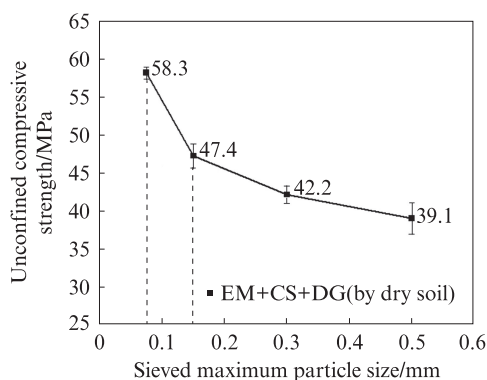


图6 原料过筛最大粒径对人造石材抗压强度的影响

Fig. 6 Effects of sieved maximum particle size of raw materials on compressive strength of artificial stone

度,更利于水热反应生成能提供强度的C-S-H和托勃莫来石晶体,形成具有较高抗压强度的材料.

不同过筛最大粒径下人造石材的 T_2 分布曲线如图7(a)所示.由图7(a)可知,随着过筛最大粒径的减小,人造石材的 T_2 分布曲线主峰向左移动,且峰面积和信号强度均有所降低.过筛最大粒径为0.5 mm的 T_2 曲线分布在0.06~25.00 ms间,而过筛最大粒径为0.075 mm的 T_2 曲线分布在0.04~12.00 ms间,人造石材的 T_2 曲线对应的峰顶点从20.95(过筛最大粒径为0.5 mm)降低至16.92(过筛最大粒径为0.075 mm),这表明随着原料过筛最大粒径的减小,人造石材内部孔隙数量不断减少,可以说明人造石材内部有更多的胶凝物质产生并填充孔隙,形成更致密的结构.

不同过筛最大粒径下人造石材孔隙分布如图7(b)所示.由图7(b)可知,随着过筛最大粒径从0.5 mm减小至0.075 mm,超大孔隙的占比也从13.50%减少至1.73%.当过筛最大粒径达到0.075 mm时,超大孔隙的占比明显降低,中孔隙占比可达58.89%,但小孔隙占比未发生较大改变,这也说明通过减小过筛最大粒径会对人造石材内部孔隙结构起到优化作用.

2.5 制样方式对人造石材性能的影响

采用干土制样和湿土制样两种方式制备的人造石材,两种混合料经搅拌后形貌如图8所示.由图8可见,干土制样与湿土制样下物料结合形态有所不同,干土制样下的渣土粉末与电石渣粉末混合更均匀,而湿土制样下的渣土颗粒多被电石渣粉末包裹,两种制样方式下物料颗粒间接触面积不同,造成其水热固化反应效果的差异,从而影

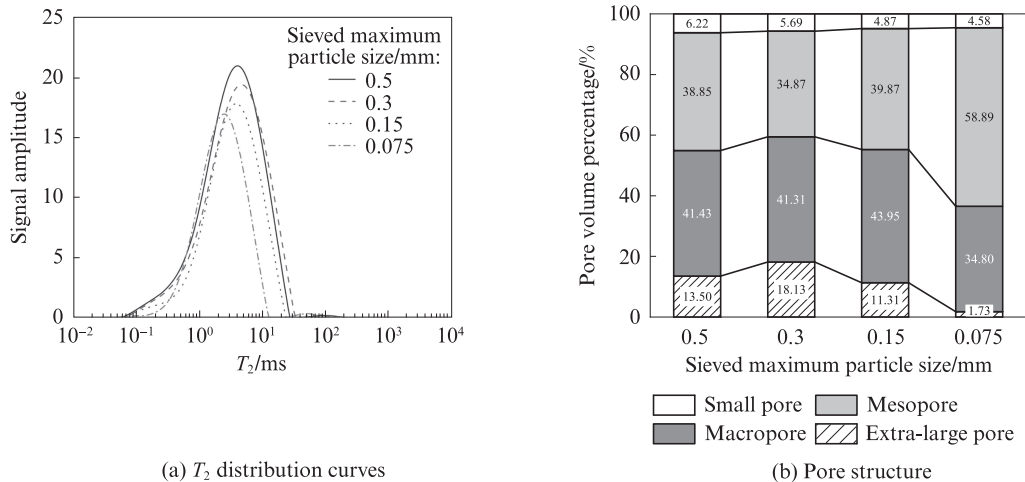
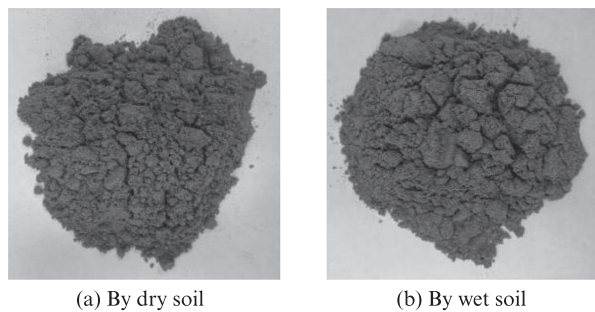
图7 原料不同过筛最大粒径下人造石材的 T_2 曲线和孔结构Fig. 7 T_2 distribution curves and pore structure of artificial stone under different sieved maximum particle sizes of raw materials

图8 不同制样方式下混合料形貌

Fig. 8 Morphology of mixtures with different sample preparation methods

响人造石材的最终强度. 试验中, 干土制样与湿土制样方式下混合料均采用了孔径为 0.5 mm 的筛子过筛, 但湿土因具有一定黏聚性, 过筛粒径均在 0.5 mm 左右, 而干土有较多粒径小于 0.5 mm 的颗粒通过, 根据 2.4 所得结论, 湿土平均过筛粒径尺寸较大, 会导致其所得最终产物抗压强度低于干土制样.

图 9 为干土制样和湿土制样方式下人造石材的 XRD 图谱. 由图 9 可见: 两种制样方式下材料未反应晶相衍射峰形态相近, 主要为石英、羟钙石和方解石等晶体; XRD 图谱中未见明显水化产物晶体特征衍射峰, 可能是由于水热反应下生成的胶凝物质多为无定形 C-S-H 凝胶, 结晶度较低^[17]; 但与湿土制样相比, 在干土制样条件下, 石英在 26.6°、50.1°和 59.9°处的特征衍射峰强度均下降, 羟钙石在 18.2°和 47.2°处的特征衍射峰强度同样有所下降, 这说明干土制样下更多 SiO_2 晶体发生溶解, 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应, 由此表明湿土制样下渣土颗粒与电石渣粉末的水热反应程度较差, 对人造石材强度增长有不利影响.

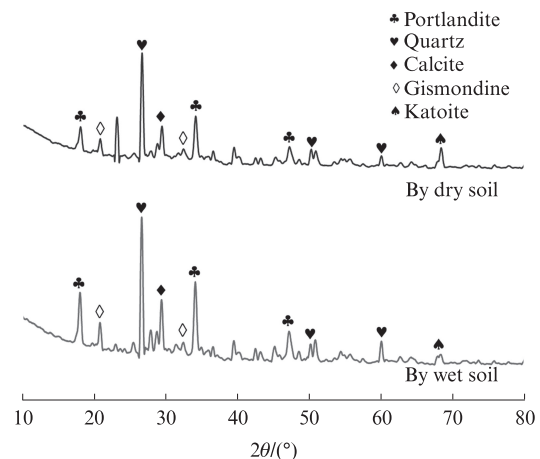


图9 不同制样方式下人造石材的 XRD 图谱

Fig. 9 XRD patterns of artificial stone under different sample preparation methods

不同制样方式下人造石材的 T_2 分布曲线和孔隙结构如图 10 所示. 由图 10 可见: (1) 干土制样下人造石材的 T_2 分布曲线峰面积为 785.02, 而湿土制样的 T_2 分布曲线峰面积则为 867.15. 峰面积的大小表征材料内部孔隙数量, 这表明干土制样下的人造石材内部孔隙数量略低于湿土制样. (2) 干土制样下人造石材内部多为中孔隙和大孔隙, 而湿土制样下超大孔隙占比最高, 可达 49.64%. 结合两者无侧限抗压强度试验结果, 可以说明超大孔隙的占比越高对材料力学性能的影响越不利.

2.6 固废基人造碎石制备工艺及其物理性能

2.6.1 制备工艺流程

干土制样需要将具有一定含水率的土样进行烘干后破碎, 这不符合产业化量产的工艺要求; 采用湿土制样更符合“就地取材”、“以废治废”的理念. 对于实验室制备的用于研究单颗粒性能的人

造碎石,其抗压强度性能测试的试样为规则的圆柱体,也不符合碎石形状不同、粒径各异特征。因此,本文试验采用湿土制样的方式,利用大容积水热反应釜进行固废基人造碎石批量化生产,其具体制备流程如图11所示,主要包括:①工程渣土初步过筛去除杂物,加入固体废弃物电石渣粉末、脱硫石膏粉末混合搅拌,然后经过二次过筛并搅拌;②液压机静压成型;③放入反应釜水热固化;④固化试样从水热反应釜取出后置于烘箱在80℃下干燥10h;⑤颚式破碎机破碎出料;⑥过筛分料。碎石化制备试验具体操作流程如图11所示。

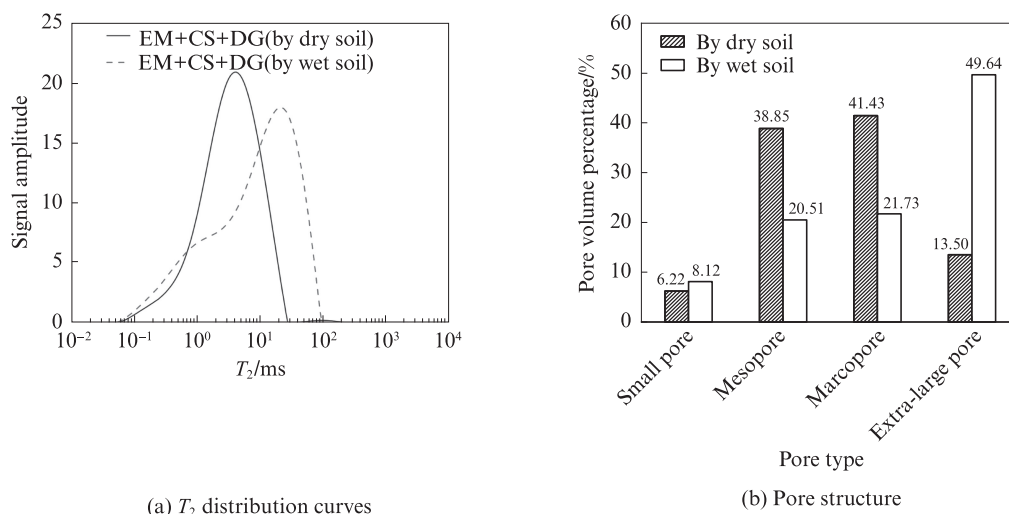


图10 不同制样方式下人造石材的 T_2 曲线和孔隙结构

Fig. 10 T_2 distribution curves and pore structure of artificial stone with different sample preparation methods

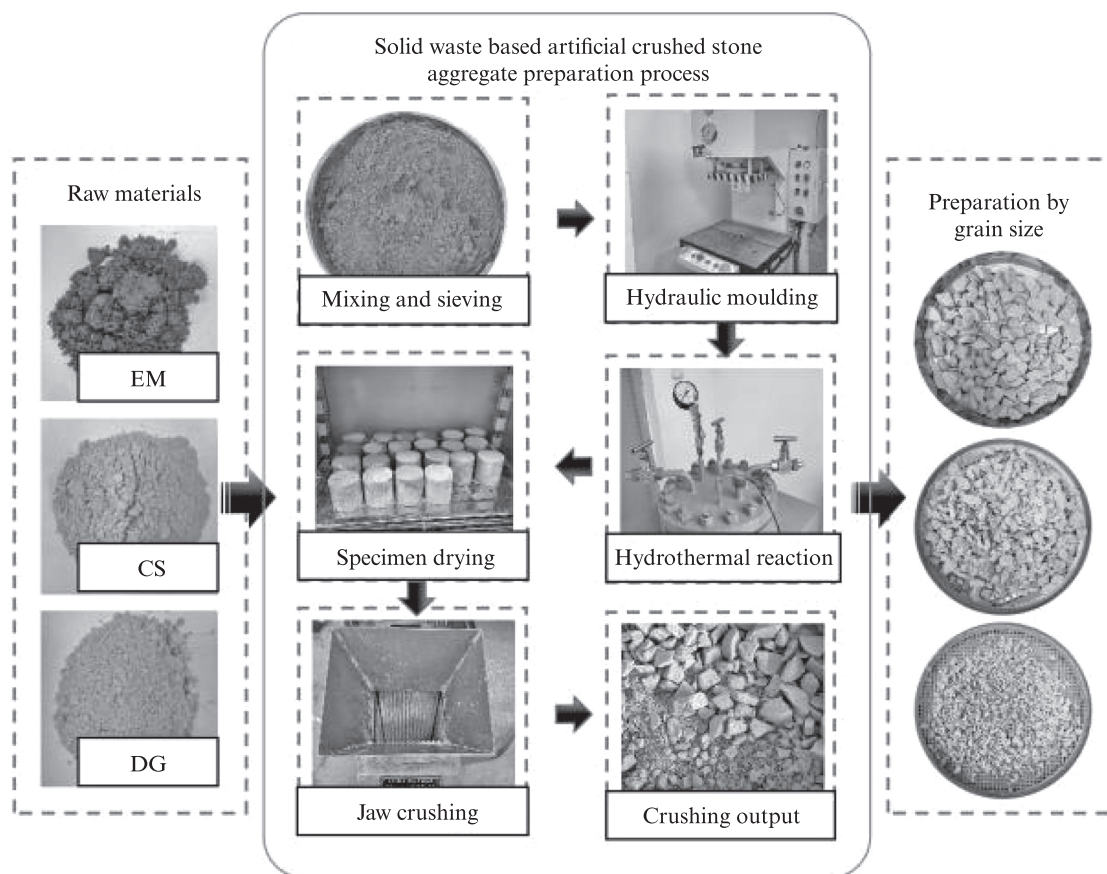


图11 固废基人造碎石制备流程

Fig. 11 Solid waste based artificial crushed stone preparation process

通过颚式破碎机破碎出料后,对破碎得到的骨料进行筛分试验,得到固废基人造碎石的颗粒组成范围如表3所示.由表3可知:经颚式破碎后粒径范围在9.5~16.0 mm内的人造碎石骨料含量最多;破碎后会形成较多粒径小于2.36 mm的细骨料,含量高达13.8%(累计筛余量为86.2%),这表明颚式破碎会造成一定量人造碎石产出损失,影响其工程性能;颚式破碎后得到的人造碎石级配不良,不能直接进行工程应用,需通过筛分试验进行分级备料.

表3 颚式破碎后固废基人造碎石颗粒的累计筛余
Table 3 Accumulated sieve residue of solid waste based artificial crushed stone after jaw crushing

Sieve size/mm	Accumulated sieve residue(by mass)/%	
	Requirement	Test value
2.36	95-100	86.2
4.75	90-100	79.2
9.5	70-90	64.5
16		22.8
19	15-45	8.0
26.5		2.1
31.5	0-5	

2.6.2 物理性能

根据GB/T 14685—2022《建筑用碎石、卵石》要

求,对生产得到的固废基人造碎石骨料进行吸水率、表观密度、堆积密度、空隙率和压碎性指标等物理性能的测定,并与废弃混凝土再生骨料和天然石灰岩进行对比,结果见表4.由表4可知:(1)由于工程渣土-电石渣水热固化合成的人造石材具有多孔的内部结构,在颚式破碎后会导致人造碎石表面产生开口孔隙,这一多孔特征使人造碎石的吸水率偏大,为21.2%,为废弃混凝土再生骨料的3.2倍和天然石灰岩的4.7倍.(2)压碎性指标是衡量骨料力学性能的一项重要指标,固废基人造碎石骨料的压碎性指标为27.1%,为天然碎石的3.8倍,但按规范GB/T 14685—2022满足Ⅲ类碎石要求.(3)制样工艺中控制材料成型干密度为1.8 g/cm³,实际产出后材料干密度会略低于初设值,自身密度偏低会影响其表观密度和堆积密度.由于制备人造碎石的主要原料(渣土、电石渣)密度较低,混合后制备生成的材料密度同样较低,可考虑作为轻质骨料应用于混凝土粗骨料、水泥稳定碎石基层材料等领域.此外,固废基人造碎石材料吸水率较高对其实际应用有不利影响,需对其耐久性能开展相关研究,以期降低人造碎石的吸水率.颚式破碎不仅会造成能耗损失、扬尘污染,而且会影响人造碎石的吸水率.因此在制样阶段如何提高人造碎石生成工艺的环保及经济效益,是未来研究的重要方向.

表4 不同类型骨料物理指标对比
Table 4 Comparison of physical properties of different types of aggregates

Aggregate type	Water absorption(by mass)/%	Apparent density/(kg·m ⁻³)	Bulk density/(kg·m ⁻³)	Crushing index(by mass)/%	Voidage(by volume)/%
Artificial crushed stone	21.2	2 478	960	27.1	61.3
Waste concrete recycled aggregate	6.7	2 597	1 372	8.7	47.2
Natural stone(limestone)	4.5	2 658	1 508	7.2	43.3
Requirement	≤2.5	>2 450	>1 350	<30	≤47

3 结论

(1)工程渣土、电石渣和脱硫石膏可在水热环境中快速生成胶凝体,提高人造石材的力学性能;随着水热反应温度的提高和时间的延长,人造石材抗压强度呈线性增长的趋势,但过高温度与过长时间均会导致材料抗压强度有所下降.

(2)增大原料成型干密度、减小过筛最大粒径均有利于提高人造石材的力学性能,减少其内部孔隙数量;水热反应生成的胶凝产物对孔隙有填充作用,材料内部超大孔逐渐转变成大孔和中孔.

(3)与干土制样下物料颗粒间接触形式不同,湿土制样下的渣土颗粒多被电石渣粉末包裹,两者间接

触面积减小,原料中钙基材料与硅基材料有效反应减少,反应活性降低,阻碍水热固化发展进程,影响水热反应效果,最终制备的人造石材抗压强度有所降低.

(4)湿土制样采用“液压成型—水热固化—颚式破碎”的工艺流程进行碎石化生产,得到固废基人造碎石,其吸水率为21.2%;其压碎性指标为27.1%,满足Ⅲ类碎石要求.

参考文献:

[1] YE W L, LI S, QIU T R, et al. Effects of plastic coating on the physical and mechanical properties of the artificial aggregate made by fly ash[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 360: 132187.

- [2] 刘军, 李振林, 张伟卓, 等. 工业固体废弃物材料制作冷粘结人造轻骨料的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(18):21090269. LIU Jun, LI Zhenlin, ZHANG Weizhuo, et al. Research advances in cold-bonded artificial lightweight aggregates made from industrial solid waste materials[J]. Materials Reports, 2023, 37(18):21090269. (in Chinese)
- [3] LIU G, HE M H, CHEN H, et al. Study on the curing conditions on the physico-mechanical and environmental performance of phosphogypsum-based artificial aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2024, 415:135030.
- [4] LIN M G, CHEN G, CHEN Y H, et al. Hydrothermal solidification of alkali-activated clay-slaked lime mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2022, 325:126660.
- [5] 佟钰, 田鑫, 张君男, 等. 废弃混凝土的水热固化与力学强度[J]. 环境工程学报, 2016, 10(7):3805-3810. TONG Yu, TIAN Xin, ZHANG Junnan, et al. Hydrothermal solidification of discarded concrete and its mechanical strength[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7):3805-3810. (in Chinese)
- [6] 兰浩然, 景镇子, 萧礼标, 等. 陶瓷废料水热固化技术在室内薄板材料上的应用[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4):882-888. LAN Haoran, JING Zhenzi, XIAO Libiao, et al. Application of hydrothermal curing technology of ceramic waste in indoor sheet materials[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4):882-888. (in Chinese)
- [7] ZHU W H, LI J, ZHANG Y F, et al. Hydrothermal synthesis of a novel ecological revetment material by sediment mixed with biochar[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 326:129380.
- [8] 孔纲强, 虞杨, 陈永辉, 等. 玄武岩粉末-电石渣-脱硫石膏水热固化机理分析[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(4):389-396, 428. KONG Gangqiang, YU Yang, CHEN Yonghui, et al. Hydrothermal solidification mechanism of basalt powder-carbide slag-desulfurized gypsum system [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(4):389-396, 428. (in Chinese)
- [9] 王德强, 孙振平, 杨海静, 等. 质子低场核磁共振技术表征建筑石膏水化进程[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(8):879-885. WANG Deqiang, SUN Zhenping, YANG Haijing, et al. Characterization of building gypsum hydration process by ^1H low-field NMR[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(8):879-885. (in Chinese)
- [10] 董伟, 王雪松, 计亚静, 等. 碳化-盐冻作用下风积沙混凝土损伤劣化机理及寿命预测[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(6):623-630, 637. DONG Wei, WANG Xuesong, JI Yajing, et al. Damage deterioration mechanism and life prediction of aeolian sand concrete under carbonization and salt freezing [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6):623-630, 637. (in Chinese)
- [11] CHEN G, LIN M G, CHEN Y H, et al. Alkali-reinforced hydrothermal solidification of waste soil[J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 289:126565.
- [12] CAI L X, DING L Y, LUO H B, et al. Preparation of autoclave concrete from basaltic lunar regolith simulant: Effect of mixture and manufacture process[J]. Construction and Building Materials, 2019, 207:373-386.
- [13] 佟钰, 刘俊秀, 夏枫, 等. 硼泥的水热固化机理与抗压强度[J]. 环境工程学报, 2015, 9(12):6090-6096. TONG Yu, LIU Junxiu, XIA Feng, et al. Reaction mechanism and compressive strength of hydrothermally solidified boron mud [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(12):6090-6096. (in Chinese)
- [14] 裘鹏程, 景镇子, 刘子系, 等. 碳酸钙基建筑材料的水热法制备及硬化机理研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2):241-246, 313. QIU Pengcheng, JING Zhenzi, LIU Zixi, et al. Wet preparation and hardening mechanism of calcium carbonate based building materials[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2):241-246, 313. (in Chinese)
- [15] NASR D, PAKSHIR H A, GHAYOUR H. The influence of curing conditions and alkaline activator concentration on elevated temperature behavior of alkali activated slag(AAS) mortars[J]. Construction and Building Materials, 2018, 190:108-119.
- [16] JI G X, PENG X Q, WANG S P, et al. Influence of ground quartz sand finesses on the formation of poorly ordered calcium silicate hydrate prepared by dynamically hydrothermal synthesis [J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20:e02746.
- [17] 彭小芹, 何丽娟, 刘艳萌. 水热法制备水化硅酸钙纳米粉体[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, 28(5):59-62. PENG Xiaoqin, HE Lijuan, LIU Yanmeng. Hydrated calcium silicate with nm-order size manufactured by using dynamic autoclaved technology [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science), 2005, 28(5):59-62. (in Chinese)