

固废基免烧人工骨料强度力学 性能与微观机制研究

刘桂芬¹ 王俊天¹ 张奕¹ 卢一鸣² 陈龙^{2,3} 叶梓^{2,3}

(1. 杭州市交通运输发展保障中心, 浙江杭州 310030; 2. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏南京 210098;
3. 河海大学苏州研究院, 江苏苏州 215100)

【摘要】 随着建筑行业对天然骨料需求的增长, 资源短缺与环境问题日益凸显, 开发人工骨料意义重大。本文以粉细砂、黏土、水泥等为原料制备固废基人工骨料, 研究其力学性能, 并探究其微观机制。通过无侧限抗压强度试验, 发现制样压力在 5~10 MPa 时, 试样强度明显上升, 10~15 MPa 时轻微上升, 15 MPa 以上强度不再随压力增加而持续增加。此外, 50% 剂泥比下免烧人工骨料强度有显著提升, 同时在粉细砂中掺黏土可改良土体性质, 添加 40% 黏土时人工骨料强度提升最显著, 但过量掺入会使强度下降。利用扫描电镜(SEM)和压汞技术(MIP)对材料微观结构进行表征, 结果表明, 50% 剂泥比试样水化产物最多且分布均匀, 75% 剂泥比试样内部形成片状结构, 抑制水泥水化, 导致试样强度降低; 15 MPa 制样压力下试样孔隙直径主要分布在 5~20 nm。本研究确定了固废基免烧人工骨料的最佳制备参数, 为解决天然骨料短缺问题、实现资源可持续利用提供了理论依据和技术支持。

【关键词】 粉细砂; 资源化利用; 免烧人工骨料; 力学性能; 微观机制

【中图分类号】 TU411

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0174

Strength mechanical properties and microscopic mechanism of unburned artificial aggregate based on solid wastes

LIU Guifen¹ WANG Juntian¹ ZHANG Yi¹ LU Yiming² CHEN Long^{2,3} YE Zi^{2,3}

(1. Hangzhou Transportation Development Security Center, Hangzhou 310030, Zhejiang, China; 2. Jiangsu Geotechnical Engineering Research Center, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 3. Suzhou Research Institute of Hohai University, Suzhou 215100, Jiangsu, China)

【Abstract】 As the demand for natural aggregates in the construction industry increases, resource shortages and environmental concerns have become more prominent, making the development of artificial aggregates highly significant. This study investigates solid waste-based artificial aggregates prepared from fine sand, clay, cement, and other raw materials, focusing on their mechanical properties and underlying microscopic mechanisms. The unconfined compressive strength tests revealed that when the sample preparation pressure ranged from 5~10 MPa, strength increased significantly, with a slight increase observed between 10~15 MPa. Above 15 MPa, no further increase in strength was observed. Furthermore, the strength of unburned artificial aggregates was notably improved at a 50% agent-to-mud ratio. The addition of clay to fine sand enhanced soil properties, with strength peaking when 40% clay was added; however, excessive clay content reduced strength. Microstructural analysis using scanning electron microscopy (SEM) and mercury intrusion porosimetry (MIP) indicated that the sample with a 50% cement ratio exhibited the highest and most evenly distributed hydration products. In contrast, the 75% cement ratio sample formed a lamellar structure that hindered cement hydration, leading to reduced strength. Pore diameters were mainly in the 5~20 nm range under a 15 MPa preparation pressure. This study establishes the optimal parameters for producing solid waste-based artificial aggregates, offering a theoretical and technical foundation for addressing natural aggregate shortages and promoting sustainable resource utilization.

【Key words】 silty fine sand; resource utilization; unburned artificial aggregate; mechanical properties; microscopic mechanism

基金项目: 浙江省交通运输厅重大交通建设工程科研项目(2024-GCKY-03); 国家重点研发计划(2024YFC3211000); 国家自然科学基金(52478335)

作者简介: 刘桂芬, 女, 1981 年生, 大学本科, 高级工程师, 主要从事道路工程研究。E-mail: 30676882@qq.com

通信作者: 叶梓, 男, 1995 年生, 工学博士, 副教授, 主要从事淤泥渣土资源化利用研究。E-mail: ziye_1995@163.com

0 引言

目前,我国建筑工程领域能耗约占全社会总能耗的 30%^[1]。一方面,建筑行业对天然原材料的需求量巨大,全球 40% 以上的原材料被用于建筑业生产,然而每吨材料中超过 85%,甚至高达 99% 的部分最终转化为废料^[2],导致建筑材料的再利用率较低;另一方面,建筑原料的开采、加工、运输及弃置等环节不仅直接产生碳排放,还引发了土壤酸化、水体污染、空气污染及生物多样性破坏等一系列直接与间接的环境影响,这些问题具有显著的持续性和复杂性^[3]。此外,建筑物在使用过程中因大量能源消耗也产生了极高的碳排放。

常规的标准重量骨料(NWA)和水泥^[4]的高产量加剧了自然资源的枯竭。例如,科威特的粗骨料采石活动已完全停止,完全依赖从邻国进口骨料。全球混凝土的生产和使用每年消耗约 400 亿吨骨料和河砂,分别占全球混凝土体积的 60% 和 75%^[5-6]。在澳大利亚的维多利亚州,预计到 2050 年,建筑项目所需的采石场材料将短缺超过 400 万吨。台湾省、阿根廷等也面临高质量天然骨料短缺的问题^[7-8],无法满足当地需求,天然骨料的短缺问题日益严重,高昂的成本和天然骨料供应不足已成为制约建筑行业发展的主要因素。

人工合成骨料作为天然骨料的替代品,可有效缓解我国天然砂石骨料紧缺的问题。目前,关于人工骨料替代天然骨料的研究主要集中在建筑垃圾及工业废料等材料的再利用^[9-10]。许事成等^[11]研究了硅灰对免烧粉煤灰陶粒宏观性能的影响,宏观试验表明,随着养护龄期的增加,硅灰掺量的提高显著提升了免烧陶粒的筒压强度,同时降低了其磨破率与吸水率;微观试验发现,适量添加硅灰有助于提高粉煤灰的水化程度,从而增强陶粒的致密性。Alqahtani 等^[12]以粉煤灰、水玻璃和少量氢氧化钠为原料制备绿色粉煤灰轻骨料(FLWA),并通过添加不同量的碳酸氢钠使 FLWA 外壳更加坚硬。Tang 等^[13]利用预拌混凝土工厂的混凝土浆废料作为胶凝黏合剂,结合垃圾-能源工厂的城市固体废物焚烧细底灰,采用球团技术生产冷黏结轻质骨料,并研究了不同养护方式对骨料性能的影响,结果表明,60 ℃ 蒸养可使骨料单颗强度达到最高,而 CO₂ 养护则使骨料吸水率降至最低。高 鹏等^[14]、曹 云等^[15]采用免烧保水法,以疏浚淤泥、水泥、石膏、黏结剂及纤维为原料制备陶粒,发现当淤泥与水泥质量比为 2.5,石膏掺量为 10%,黏结剂掺量为 1% 时,养护 28 d 后所得陶粒性

能最优,其单颗强度为 4.49 MPa,颗粒密度为 1.3 g/cm³,1 h 吸水率为 9.78%。然而,建筑垃圾骨料化应用往往因需要复杂的预处理工序导致成本偏高;工业固废则具备较强的地域性,如煤矸石、钢渣等工业固废常作为煤炭工业副产品排出,对于轻工业地区很难找到合适的原料。粉细砂是我国江浙地区常见的土源,料源广阔、资源化利用率极低,目前关于将其作为骨料的研究有限。因此,利用粉细砂与工业固废混合物制备具有工程性能的免烧人工骨料,可实现渣土固废与工业固废协同运用,具有广阔的研究前景。

本文试验研究以粉细砂、黏土、水泥、矿渣微粉及聚羧酸减水剂为原材料,采用物理压制方法,通过调整制样压力、水泥矿粉含量比及拌合物种类,探究不同条件下免烧人工骨料材料的无侧限抗压强度变化规律,并利用压汞技术(MIP)和扫描电镜技术(SEM)表征材料内部孔隙分布特征。通过加压方式制备的免烧固废基人工骨料可替代部分天然骨料,应用于道路工程建设和混凝土材料制备。若能实现人工骨料的规模化生产并探索其工程应用,将对推动我国资源可持续发展具有重要意义,从而实现“以废治废”的目标。

1 试验准备

本研究采用的主要原料包括固体废弃物粉质细砂、矿渣微粉以及水泥。

试验中用土取自杭州市某地铁开挖处,属于粉质细砂,后文 2.3 节中所用黏土为杭州地铁开挖盾构土。使用的固体激发剂来自诸城市某建材公司,选用型号为 S95 颗粒矿粉,减水剂采用萘系减水剂^[16],制样水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。制样所用粉细砂与黏土基本物理性质指标见表 1,级配见图 1,土的物理力学试验方法见文献^[17-18]。

表 1 试验用粉细砂物理性质指标
Tab. 1 Physical characteristic indicators of experimental soils

土类	密度 (g·cm ⁻³)	含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	粉粒占比 /%	黏粒占比 /%
粉细砂	1.64	26	34	25	98.4	1.6
黏土	1.68	42	45	27	45.9	54.1

试验以工程中的粉质细砂为基础材料,湿法制样下保持工程粉质细砂原有含水率,设定混合料中掺入的水泥含量为干燥粉细砂质量的 40%,液体激发剂质量为干燥粉细砂质量的 0.1%,水灰质量比为 0.5;在此基础上,进一步添加的固体激发剂质量占水泥质量的百分比,称之为剂泥比,分别为 0%, 25%, 50%,

75%,用于寻找最佳的固体激发剂(由矿渣组成)和水泥的比例,而后设定制样压力为 3, 5, 10, 15, 20 MPa, 具体情况见表 2。

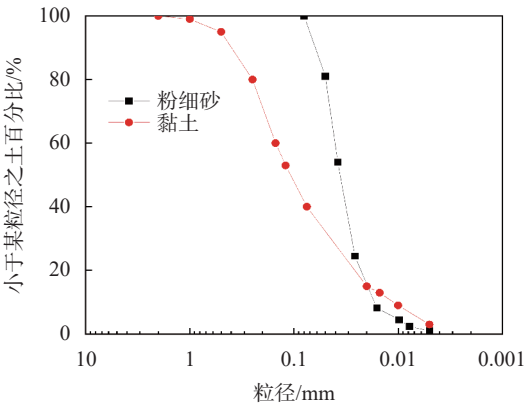


图 1 颗粒级配曲线图
Fig. 1 Grain gradation curve

表 2 多组试样配比表
Tab. 2 Proportion table of multi-group samples

制样压力 /MPa	水泥 掺量/%	固体 激发剂掺量/%	液体 激发剂掺量/%	密度 /(g·cm ⁻³)	养护 时间/d
3	22.2	11.1	0.1	1.94	3~28
5	22.2	11.1	0.1	1.94	3~28
10	22.2	11.1	0.1	1.99	3~28
15	25	0	0.1	2.05	3~28
15	23.5	5.9	0.1	2.05	3~28
15	22.2	11.1	0.1	2.05	3~28
15	21.1	15.8	0.1	2.05	3~28
20	22.2	11.1	0.1	2.08	3~28

制样方式均利用 JJ-5 水泥胶砂搅拌机将原料进行充分混合,选定低速档(140±5) r/min 搅拌 5 min 后改用高速档(285±5) r/min 再次搅拌 3 min。试样尺寸设置为 $\phi 50\times 50$ mm,试样制备通过液压千斤顶静压成型,使用液压脱模仪进行脱模,取出试样进行免烧人工骨料材料的无侧限抗压强度试验。

2 无侧限抗压强度影响分析

2.1 制样压力的影响

本研究通过系统对比不同制样压力(3~20 MPa)对免烧人工骨料强度发展的影响规律,揭示了压力参数与材料性能的关联机制。如图 2 所示,在固定胶凝材料配比(22.2% 水泥、11.1% 固体激发剂、11.1% 水、0.1% 液体激发剂)条件下,试样 28 d 抗压强度随制样压力增加呈现先升后降的非线性关系:当压力由 3 MPa 提升至 10 MPa 时,28 d 强度从 13.23 MPa 显著增长至 20.61 MPa,增幅达 55.8%;继续加

压至 15 MPa 和 20 MPa 时,强度分别下降至 19.56 MPa 和 19.43 MPa,较 10 MPa 制样压力的试样强度分别降低 5.1% 和 5.7%,制样压力表现出明显的阈值效应,即 10 MPa 制样压力之前材料强度与制样压力呈正相关,而后继续增加制样压力对材料强度存在负影响。

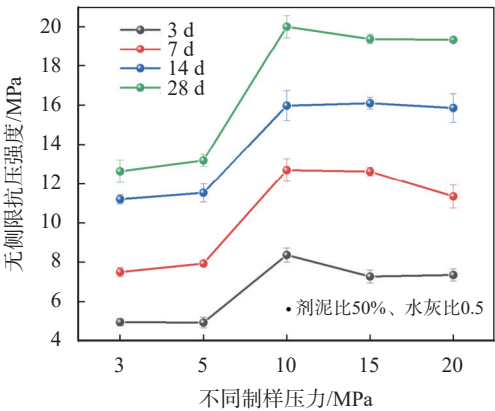


图 2 不同制样压力无侧限抗压强度图
Fig. 2 Unconfined compressive strength diagram of different sample preparation pressures

具体分析不同养护阶段的强度演化特征发现,3 MPa 压力组在 28 d 养护期内呈现持续增长态势(日均强度增幅 0.29 MPa),而 10 MPa 压力组展现出最优早强特性,其 3 d 强度即达 8.72 MPa,较 3 MPa 组提升 70.3%。值得注意的是,在 10 MPa 压力条件下,各龄期强度均达到峰值:3 d 强度(8.72 MPa)较次优的 5 MPa 组(5.2 MPa)提高 67.7%;7 d 强度(13.23 MPa)较 15 MPa 组(12.86 MPa)提升 2.9%;14 d 强度(16.56 MPa)较 15 MPa 组(16.43 MPa)增加 0.8%;28 d 强度(20.61 MPa)较其他压力组提高 5.7%~55.8%。

尽管 20 MPa 压力组在后期养护阶段(14~28 d)仍保持 16.21~19.43 MPa 的强度水平,但其 7 d 强度(11.21 MPa)较 10 MPa 组(13.23 MPa)降低 15.3%,揭示出过高压力可能影响材料早期水化进程。结合微观结构分析,推测当压力超过 10 MPa 临界值后,骨料颗粒过度密实化可能阻碍胶凝产物的充分发育。基于上述规律,本研究选择 15 MPa 作为后续试验制样压力(28 d 强度 19.56 MPa),该参数在保证 90% 峰值强度的同时,可降低 12.5% 的成型能耗,实现材料性能与制备成本的优化平衡。

2.2 固体激发剂含量的影响

在岩土工程材料研究中,探究不同固体激发剂含量和水泥含量比例对土体加固强度的影响至关重要。

本研究对不同配比试样在 15 MPa 制样压力下进行 3, 7, 14, 28 d 养护并分析强度变化。这里定义固体激发剂掺量与水泥掺量的比值为剂泥比。添加 25% 水泥、0% 固体激发剂(0% 剂泥比)、12.5% 水、0.1% 液体激发剂的试样, 3 d 抗压强度 2.89 MPa, 7 d 增长至 3.78 MPa, 增长 0.89 MPa, 增长率约 30.8%; 14 d 达 5.43 MPa, 较 7 d 增长 1.65 MPa, 增长率约 43.6%; 28 d 强度 7.08 MPa, 相比 14 d 增长 1.65 MPa, 增长率约 30.4%。添加 26.7% 水泥、6.7% 固体激发剂(25% 剂泥比)、13.3% 水、0.1% 液体激发剂的试样, 3 d 强度 2.41 MPa, 较 0% 剂泥比试样降低 0.48 MPa; 7 d 提升至 5.64 MPa, 增长 3.23 MPa, 增长率 134.0%, 比 0% 剂泥比同期高出 1.86 MPa; 14 d 强度 6.17 MPa, 较 7 d 增长 0.53 MPa, 增长率约 9.4%; 28 d 强度 8.15 MPa, 相比 14 d 增长 1.98 MPa, 增长率约 32.1%。含 25% 水泥、12.5% 固体激发剂(50% 剂泥比)、12.5% 水、0.1% 液体激发剂的试样表现最佳, 3 d 强度 7.66 MPa, 7 d 增长至 12.86 MPa, 增长 5.2 MPa, 增长率约 67.9%; 14 d 强度 16.43 MPa, 较 7 d 增长 3.57 MPa, 增长率约 27.8%; 28 d 强度 19.56 MPa, 为各配比最高值, 加固效果最为显著, 如图 3 所示。添加 23.5% 水泥、17.6% 固体激发剂(75% 剂泥比)、11.7% 水、0.1% 液体激发剂的试样各龄期强度均低于 50% 剂泥比试样, 3 d 强度 4.25 MPa, 7 d 增长至 7.4 MPa, 增长 3.15 MPa, 增长率约 74.1%; 14 d 强度 8.86 MPa, 较 7 d 增长 1.46 MPa, 增长率约 19.7%, 28 d 强度 11.03 MPa, 相比 14 d 增长 2.17 MPa, 增长率约 24.5%。

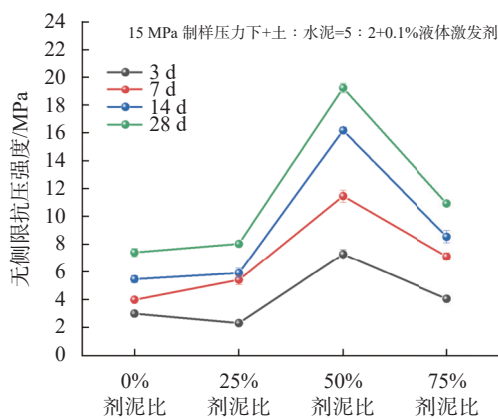


图 3 不同剂泥比含量无侧限抗压强度图
Fig. 3 Unconfined compressive strength diagram of different agent-mud ratio contents

通过添加固体激发剂的方式加固土体强度, 能明显发现不同剂泥比以及制样压力的变化对于土的加固效果具有显著影响, 在剂泥比达到 50% 时效果最佳(见图 3); 观察发现在养护龄期 3 d 的情况下

15 MPa 制样压力添加 20% 矿粉的试样相比无添加矿粉的试样强度增长了 1.82 倍, 在养护龄期 7 d 的情况下强度增长了 1.55 倍, 在养护龄期 28 d 的情况下强度增长了 1.4 倍, 由此可以得出矿粉对土体的早期强度具有显著提升作用。

2.3 黏土含量

在粉细砂中辅掺黏土可以显著改良土体性质, 提高免烧人工骨料性能。无侧限抗压强度试验显示, 加入 40% 黏土时 3, 7, 14 d 的强度分别为 5.50, 8.69, 13.02 MPa; 加入 20% 黏土时 3, 7, 14 d 的强度分别为 3.64, 5.61, 6.92 MPa; 不加入黏土时 3, 7, 14 d 的强度分别为 3.10, 4.13, 5.71 MPa; 试验结果见图 4。由此可知, 随着黏土的加入, 土体的强度在各个时间段都得到有效增强。特别是在粉细砂中加入 40% 黏土时, 免烧人工骨料强度达到峰值, 可以显著提升免烧人工骨料强度, 具备良好的应用价值。但当进一步提高黏土掺量, 可以发现试样强度显著下降, 当加入 80% 黏土时, 其 14 d 无侧限抗压强度相较 40% 黏土下降了 47.4%。可见复掺黏土含量存在阈值, 超过这阈值后, 试样强度显著损失。复掺黏土对材料无侧限抗压强度的贡献可归因于黏土微粒对材料微观结构的协同优化作用。从颗粒级配曲线中可以发现, 添加黏土能有效地补充 0.02 ~ 0.006 mm 部分的细颗粒, 此外补充大粒径土颗粒也可更有效地形成嵌挤结构, 降低整体孔隙率, 压汞实验就显示 40% 黏土组有害孔隙(>50 nm)占比最低。在此基础上, 黏土离子交换增强颗粒间引力, 并黏土中的活性硅铝成分(如蒙脱石、高岭石)在碱性环境中参与二次水化反应, 与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成附加 C-S-H 凝胶, 形成致密的网格结构。

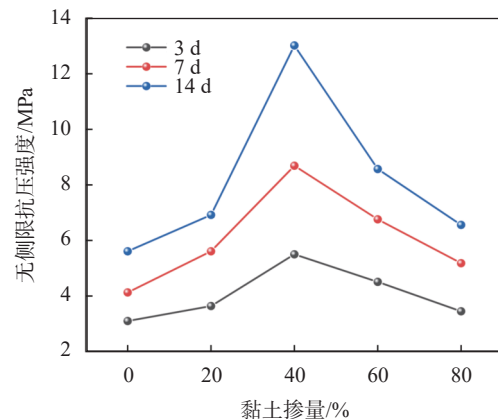


图 4 不同黏土掺量无侧限抗压强度图
Fig. 4 Unconfined compressive strength diagram of different clay content

3 微观机理

3.1 SEM 电镜

采用 Hitachi Regulus 8100 扫描电子显微镜对不同试样的微观结构进行扫描检测,探究其微观机理。结果分别如图 5、图 6 所示。图 5 为 15 MPa 制样压力下 0%, 25%, 50%, 75% 剂泥比养护 3 d 的试样;图 6 为 15 MPa 制样压力下 0%, 25%, 50%, 75% 剂泥比养护 28 d 的试样。图 7 为 50% 剂泥比下不同制样压力的试验图像。

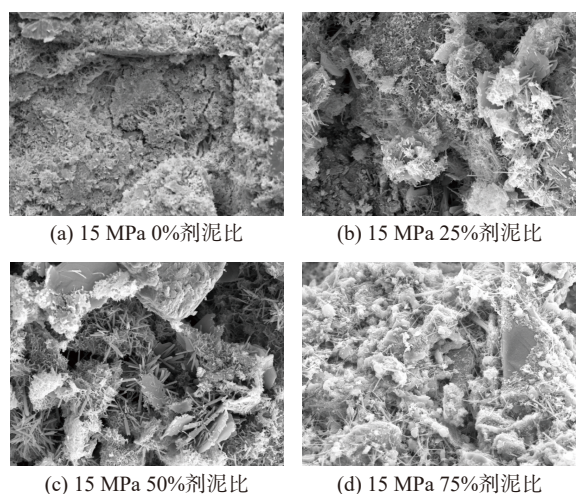


图 5 15 MPa 制样压力下不同剂泥比 SEM 图 (3 d 养护)
Fig. 5 SEM images of different agent-mud ratios under 15 MPa sample preparation pressure (3 d curing day)

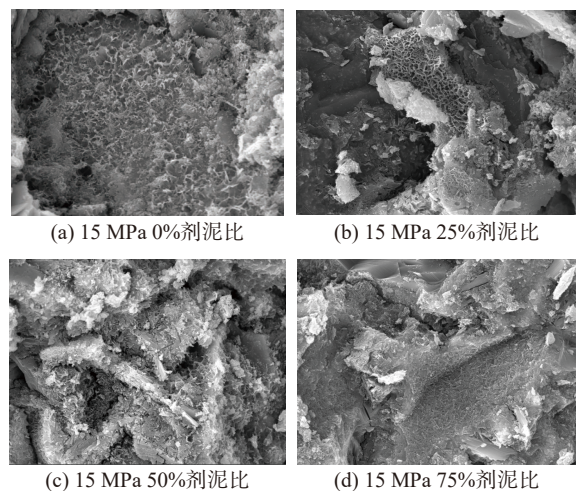


图 6 15 MPa 制样压力下不同剂泥比 SEM 图 (28 d 养护)
Fig. 6 SEM images of different agent-mud ratios under 15 MPa sample preparation pressure (28 d curing day)

通过对比图 5(a)—图 5(d)能明显观察到固化土颗粒排列紧密,土颗粒表面被胶凝材料所包裹,固化土整体化程度高,胶凝材料水化充分,基本看不到大孔隙。0% 剂泥比下,水化产物以片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 为主,分布稀疏,土颗粒间可见 $>1\ \mu\text{m}$ 孔隙,导致 3 d 早期

强度仅 2.89 MPa。在 15 MPa 制样压力下随着矿粉含量的增加,强度逐渐增加。特别是矿粉含量到 50% 时,图中絮状物水化硅酸钙(C-S-H)含量明显升高,同时结构开始由絮状转变为条状结构,大量纤维状 C-S-H 凝胶与针状 AFt 交织成三维网络,包裹土颗粒并填充孔隙,孔隙率最低,对应 28 d 强度峰值 19.56 MPa。对比图 6(a)—图 6(d)能明显观察到 28 d 后在 15 MPa 制样压力下随着剂泥比增加,与 3 d 电镜图不同的是,随着时间推移,絮状物会凝聚在一起结成大块土样,尤其在剂泥比达到 75% 时形成片状结构,留出来的孔隙部分减小。然而,可以发现部分矿粉覆盖未水化水泥颗粒,阻断水化路径,形成局部片状聚集结构,致密性下降,强度降至 11.03 MPa。因此,剂泥比高于 50% 后,过量矿渣会抑制水泥的水化反应,从而导致土体的强度降低。与此同时,从图 7(a)—图 7(d)可以发现,随着制样压力不断增加,试样内部孔隙逐渐压密,且 C-S-H 凝胶更为致密,提供了更高的材料强度。

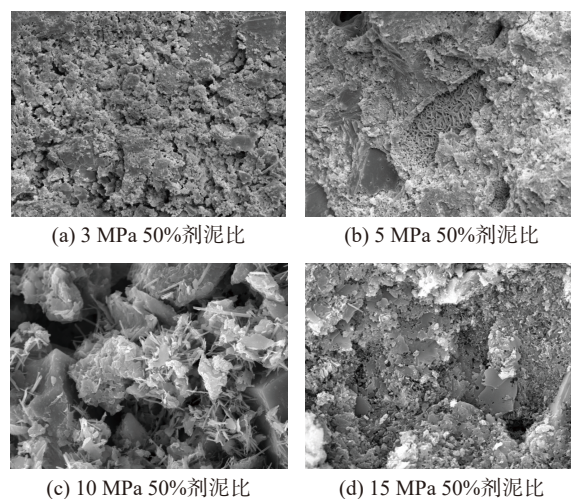


图 7 不同制样压力下 50% 剂泥比 SEM 图 (3 d 养护)
Fig. 7 SEM image of 50% agent-mud ratio under different sample preparation pressures (3 d curing)

3.2 压汞实验

图 8 为 15 MPa 制样压力下泥剂比含量分别为 0%, 25%, 50%, 75% 养护 3 d 的试样分别累计进汞曲线,曲线斜率代表某孔径范围内进汞量的变化。由图可见,累计进汞曲线变化情况具有 3 个阶段的特征:第 1 阶段为缓慢增长阶段,进汞量随着汞压的增加缓慢增长;第 2 阶段为快速增长阶段,随着汞压的增加,进汞量迅速增加,增长率先增大后减小;第 3 阶段为稳定阶段,进汞量基本不再随汞压的增大而增加,至此土体孔隙中全部充满水银。图 8 中 15 MPa 制样压力下 0% 剂泥比含量的试样进汞量,从 5×10^5

nm 开始进汞, 约在 9×10^1 nm 处出现转折点进入第二阶段, 进汞量迅速增加, 然后在 50 nm 时趋于平缓, 在 5 nm 时进汞量基本不再增加, 由此可以判断孔隙直径大多分布在 5 ~ 50 nm; 图 8 中 15 MPa 制样压力下 25% 剂泥比含量的试样进汞量, 从 5×10^5 nm 开始进汞, 约在 9×10^1 nm 处出现转折点进入第二阶段, 进汞量迅速增加, 然后在 25 nm 时趋于平缓, 在 5 nm 时进汞量基本不再增加, 由此可以判断孔隙直径绝大部分分布在 5 ~ 25 nm; 图 8 中 15 MPa 制样压力下 50% 剂泥比含量的试样进汞量, 从 5×10^5 nm 开始进汞, 约在 9×10^1 nm 处出现转折点进入第二阶段, 进汞量迅速增加, 然后在 20 nm 时趋于平缓, 在 5 nm 时进汞量基本不再增加, 由此可以判断孔隙直径绝大部分分布在 5 ~ 20 nm; 图 8 中 15 MPa 制样压力下 75% 剂泥比含量的试样进汞量, 从 5×10^5 nm 开始进汞, 约在 9×10^1 nm 处出现转折点进入第二阶段, 进汞量迅速增加, 然后在 15 nm 时趋于平缓, 在 5 nm 时进汞量基本不再增加, 由此可以判断孔隙直径绝大部分分布在 5 ~ 15 nm。

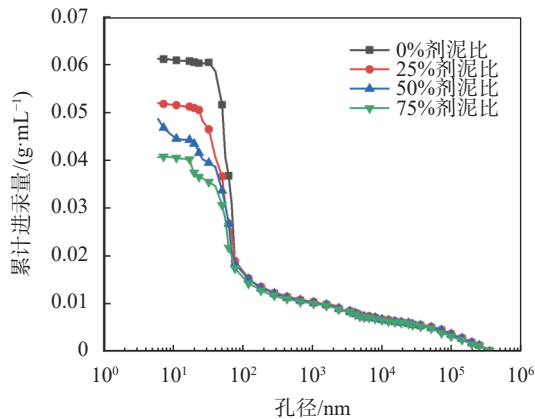


图 8 15 MPa 制样压力下不同剂泥比孔径分布图

Fig. 8 Distribution of specific pore diameter of different agents and mud under 15 MPa sample preparation pressure

图 9 为 3, 5, 10, 15 MPa 条件下 50% 剂泥比含量养护 3 d 的试样分别的累计进汞曲线(后直接采用 3, 5, 10, 15 MPa 表示), 曲线斜率代表某孔径范围内进汞量的变化。由图可见, 累计进汞曲线变化情况具有 3 个阶段的特征: 第 1 阶段为缓慢增长阶段, 进汞量随着汞压的增加缓慢增长; 第 2 阶段为快速增长阶段, 随着汞压的增加, 进汞量迅速增加, 增长率先增大后减小; 第 3 阶段为稳定阶段, 进汞量基本不再随汞压的增大而增加, 至此土体孔隙中全部充满水银。图 9 中 3, 5 MPa 制样压力下的试样从 5×10^5 nm 开始进汞, 约在 1.8×10^4 nm 处出现转折点, 进汞量迅速增加, 在 4×10^3 然后趋于平缓, 在 5 nm 时进汞量基本

不再增加, 由此可以判断孔隙直径绝大部分分布在 5 ~ 4000 nm; 图 9 中 10 MPa 制样压力下的试样从 5×10^5 nm 开始进汞, 在 9×10^3 nm 时出现转折, 进汞量迅速增加, 最终在 6×10^1 趋于平稳, 在 5 nm 时进汞量基本不再增加, 由此可以判断孔隙直径绝大部分分布在 5 ~ 60 nm。图 2.19 中 15 MPa 制样压力下的试样从 5×10^5 nm 开始进汞, 在 1×10^2 nm 时出现转折, 进汞量迅速增加, 最终在 2×10^1 趋于平稳, 在 5 nm 时进汞量基本不再增加, 由此可以判断孔隙直径绝大部分分布在 5 ~ 20 nm。

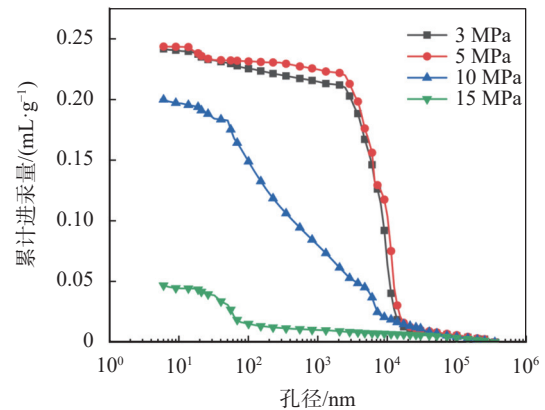


图 9 不同制样压力下 50% 剂泥比试样孔径分布图

Fig. 9 Pore diameter distribution of 50% agent-mud ratio sample under different sample preparation pressures

综合分析图 8 和图 9 可以发现, 孔径分布与宏观强度具备显著关联机制。当试样中存在大量 >50 nm 的有害孔隙时, 如 3 MPa 压力组占比达 70%, 其作为应力集中源显著削弱材料整体性, 导致 28 d 强度仅 13.23 MPa; 而 15 MPa 制样压力、50% 剂泥比试样中 85% 以上孔隙集中于 5 ~ 20 nm 无害孔范围, 此类孔隙主要为 C-S-H 凝胶层间孔, 支撑 28 d 强度提升至 19.56 MPa。值得注意的是, <5 nm 微孔虽对强度无直接贡献, 但其过量存在, 如 75% 剂泥比试样, 往往反映未完全水化的胶凝相, 与强度衰减呈负相关。综合而言, 制样压力与剂泥比通过协同调控孔隙尺度分布(如 10 MPa 压力使 >50 nm 大孔占比降低 30%)以及水化产物形态, 实现了孔隙结构优化, 最终表现为强度增益。

因此, 人工骨料强度在剂泥比约 50% 和制样压力 10 ~ 15 MPa 时达到峰值并出现阈值, 其根本原因在于微观结构的质变而非单纯的孔隙率降低。当剂泥比超过 50% 时, 虽然总孔隙率继续下降, 但过量矿粉(固体激发剂)严重干扰了水泥的正常水化过程。这导致两个关键问题: 一是矿粉颗粒覆盖未水化水泥颗粒, 阻断其水化路径; 二是矿粉与水泥竞争水分和

反应环境,抑制了关键胶凝产物,如C-S-H凝胶和钙矾石的充分生成和均匀分布。扫描电镜清晰显示,75%剂泥比试样内部形成的是片状结构而非均匀的三维网络,可能产生局部缺陷。同时也得到了压汞结果的佐证,尽管总孔隙数少,但<5 nm的微孔比例显著升高,这些微孔往往与未完全水化的区域相关,对强度贡献甚微甚至不利。类似地,制样压力超过10~15 MPa后,过度压实带来的负面效应开始成为主导。虽然高压使颗粒排列更紧密,孔隙进一步细化,但同时也极大地限制了水分在试样内部的迁移和扩散。这表现为尽管后期孔隙可能很细小,但关键的水化胶凝产物未能充分形成和连接颗粒,宏观上就体现为强度无法继续提升甚至略有下降,即制样压力20 MPa组早期强度显著低于10 MPa组。因此,强度的峰值本质上是由水化反应的充分性、水化产物的分布均匀性与形态主导的优化孔隙结构三者协同作用决定的,单纯追求低孔隙率或高压密实反而可能导致微观结构劣化,从而限制了强度的持续增长。

4 结论

通过压制成型技术将废弃粉细砂-水泥-激发剂进行混合,生成水化胶凝产物,将无机废弃物制备成具有一定强度的免烧固废基人工骨料材料,通过开展无侧限抗压强度试验、压汞试验和扫描电镜等测试方法,研究不同合成条件下压制成型人工骨料材料的力学性能和微观孔隙特征的演化规律,得到了压制成型人工骨料材料最佳试验工况,在此基础上掺入了其他无机废弃物进行相应的参数对照,主要结论如下:

(1)制样压力在5~10 MPa时,试样强度呈明显的上升趋势,制样压力10~15 MPa时,试样强度则轻微上升,而在制样压力在15 MPa以上时,试样强度不再随着制样压力的增加而增加,在7,28 d试样强度最大变化率分别为15%,5.7%。综合考虑推荐采取15 MPa制样压力进行后续试验。

(2)在粉细砂中辅掺黏土可以显著改良土体性质,提高人工骨料性能。通过无侧限抗压强度试验发现,加入40%黏土时,材料强度提升最为显著。

(3)SEM结果显示50%剂泥比试样水化产物最多且分布最为均匀,75%剂泥比试样内部形成片状结构,留出来的孔隙部分减小,因抑制水泥的水化反应,从而导致土体的强度降低。

(4)15 MPa制样压力下的试样从 5×10^5 nm开始进汞,在 1×10^2 nm时出现转折,进汞量迅速增加,最终在 2×10^1 nm趋于平稳,在5 nm时进汞量基本不再增加,由此可以判断孔隙直径绝大部分分布在5~

20 nm范围。

参考文献

- [1] 张智慧,尚春静,钱坤.建筑生命周期碳排放评价[J].建筑经济,2010(2):44-46. (ZHANG Z H, SHANG C J, QIAN K. Carbon emission assessment of building life cycle[J]. Construction Economy, 2010(2): 44-46. (in Chinese))
- [2] PACHECO-TORGAL F. Introduction to advances in construction and demolition waste[M]//PACHECO-TORGAL F, DING Y N, COLANGELO F, et al. Advances in Construction and Demolition Waste Recycling: Management, processing and Environmental Assessment. Cambridge: Woodhead Publishing, 2020: 1-10.
- [3] 黄蓓佳,赵凤,赵娟,等.建筑材料隐含环境影响评估[J].环境科学研究,2017,30(6):929-936. (HUANG B J, ZHAO F, ZHAO J, et al. Embodied environmental impact of building materials[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(6): 929-936. (in Chinese))
- [4] ALBAHAR S, AL-OTAIBI S, AL-FADALA S B, et al. Process using multiple waste streams to manufacture synthetic lightweight aggregate: US9340456B2[P]. 2016-05-17.
- [5] GRAVINA R J, XIE T Y, GIUSTOZZI F, et al. Assessment of the variability and uncertainty of using post-customer plastics as natural aggregate replacement in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121747.
- [6] XIE T Y, GHOLAMPOUR A, OZBAKKALOGLU T. Toward the development of sustainable concretes with recycled concrete aggregates: comprehensive review of studies on mechanical properties[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(9): 04018211.
- [7] TANG C W, CHEN H J, WANG S Y, et al. Production of synthetic lightweight aggregate using reservoir sediments for concrete and masonry[J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(2): 292-300.
- [8] ZEGA C J, VILLAGRÁN-ZACCARDI Y A, DI MAIO A A. Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates[J]. Materials and Structures, 2010, 43(1/2): 195-202.
- [9] 陈廷柱,王昀韬,刘涛,等.建筑垃圾再生骨料性能研究与应用进展[J].水泥工程,2023(5):70-74. (CHEN T Z, WANG Y T, LIU T, et al. Research and application progress on performance of recycled aggregate of construction waste[J]. Cement Engineering, 2023(5): 70-

74. (in Chinese))
- [10] DENG Z M, ZHANG S Y, DENG Z J. PVA fiber-reinforced geopolymers made with hybrid recycled aggregates: Toward thermal insulation, lightweight and improved durability[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 426: 139200.
- [11] 许事成, 苏壮飞, 刘 泽, 等. 硅灰掺量对免烧粉煤灰陶粒性能的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(2): 506-512. (XU S C, SU Z F, LIU Z, et al. Influence of silica fume content on performance of non-sintered fly ash ceramsite[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(2): 506-512. (in Chinese))
- [12] ALQAHTANI F K, RASHID K, ZAFAR I, et al. Assessment of morphological characteristics and physico-mechanical properties of geopolymers green foam lightweight aggregate formulated by microwave irradiation[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 35: 102081.
- [13] TANG P, XUAN D X, CHENG H W, et al. Use of CO₂ curing to enhance the properties of cold bonded lightweight aggregates (CBLAs) produced with concrete slurry waste (CSW) and fine incineration bottom ash (IBA)[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 381: 120951.
- [14] 高 鹏, 徐悦清, 曹 云, 等. 淤泥基免烧陶粒的制备及性能影响因素 [J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(3): 889-899. (GAO P, XU Y Q, CAO Y, et al. Preparation and performance influencing factors of silt-based non-sintered ceramsite[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(3): 889-899. (in Chinese))
- [15] 曹 云. 河湖淤泥基免烧陶粒的制备及其性能研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2020. (CAO Y. Preparation and properties of unburned ceramsite based on river and lake silt[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2020. (in Chinese))
- [16] 蒋玉梅, 刘江涛, 李 荣. 萘系高效减水剂的研究进展 [J]. *化学世界*, 2017, 58(2): 124-128. (JIANG Y M, LIU J T, LI R. Research progress of naphthalene series highly efficient water reducing agent[J]. *Chemical World*, 2017, 58(2): 124-128. (in Chinese))
- [17] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of soil: GB/T 50145—2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese))
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))

收稿日期: 2025-04-15