文章编号:2096-5052(2026)03-0056-10　　DOI:10.19952/j.cnki.2096-5052.2026.03.06

# 盾构渣土基陶粒改性制备、微观表征及性能调控

李春林[1],王旌[2,3],熊逸凡[4,5],张雅铭[2,3],于啸[2,3],江浩[2,3*],张益杰[2,3],韩学成[2,3]

(1. 济南城市建设集团有限公司, 山东 济南 250014;
2. 山东大学隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 山东 济南 250061;
3. 山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250002; 4. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063;
5. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心, 湖北 武汉 430063)

**摘要**:盾构法施工产生的大量渣土堆置易引发土地资源占用、扬尘污染及滑坡等环境与安全问题。现有渣土陶粒研究多聚焦单一配方,对粉煤灰、秸秆等不同外加剂的改性作用规律及微观性能调控机理缺乏系统剖析。本研究以济泺路穿黄隧道盾构渣土为主要原料,分别引入粉煤灰、秸秆作为外加剂,制备纯渣土、粉煤灰复合、秸秆复合 3 类陶粒,系统探究烧结温度、时间及材料配比对陶粒烧失量、堆积密度、筒压强度等性能的影响规律,结合扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、能谱仪(energy dispersive spectroscopy, EDS)及核磁共振孔隙测试揭示微观结构与性能的内在关联。结果表明,纯渣土陶粒在 1 100 ℃烧结、小粒径(≤10 mm)时筒压强度最优(10.8 MPa);质量分数 50%的粉煤灰复合陶粒在 900~1 100 ℃区间力学性能突出(18.2 MPa);质量分数 10%的秸秆复合陶粒可在 250 ℃、20 min 低温条件下成型,吸水率达 27.69%。3 类陶粒微观结构差异显著,分别呈致密、胶凝均匀、松散多孔特征,元素组成与原料及烧结工艺密切相关。本研究为盾构渣土资源化利用提供了新路径。

**关键词**:盾构渣土;陶粒;微观结构;性能优化;烧结工艺
**中图分类号**:U45;U25　　**文献标志码**:A

**引用格式**:李春林,王旌,熊逸凡,等. 盾构渣土基陶粒改性制备、微观表征及性能调控[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2026,8(3):56-65. Li Chunlin, Wang Jing, Xiong Yifan, et al. Modified preparation, microscopic characterization, and performance regulation of shield muck-based ceramsite[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(3):56-65.

# Modified preparation, microscopic characterization, and performance regulation of shield muck-based ceramsite

Li Chunlin[1], Wang Jing[2,3], Xiong Yifan[4,5], Zhang Yaming[2,3], Yu Xiao[2,3], Jiang Hao[2,3*], Zhang Yijie[2,3], Han Xuecheng[2,3]

(1. Jinan City Construction Group Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China;
2. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China;
3. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China;
4. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China;
5. National-Local Joint Engineering Research Center of Underwater Tunnelling Technology, Wuhan 430063, Hubei, China)

**Abstract**: The stockpiling of massive muck produced by shield tunnelling construction easily triggers a series of environmental and safety problems, including land resource occupation, dust pollution and slope sliding. Most existing studies on ceramsite prepared from shield tunnelling muck focus merely on single formulation schemes, while systematic analyses on the modification laws of different admixtures (e.g., fly ash and straw) and their microstructural regulation mech-

**收稿日期**:2026-04-21;**修回日期**:2026-06-17;**接受日期**:2026-07-08;**出版日期**:2026-09-20
**基金项目**:新高校 20 条高层次创新团队(自主培养)资助项目(202534007);济南城市建设集团有限公司科技开发计划资助项目(2020W003);中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研究资助项目(TSYSDY-JLLCHSD[2020]-02)
**第一作者简介**:李春林(1986— ),男,山东莱西人,高级工程师,主要研究方向为工程建设。E-mail:lichunlin0212@126.com
*通信作者简介:江浩(1991— ),男,山东沂水人,工程师,博士研究生,主要研究方向为盾构智能建造与灾害防控。
E-mail: 202085009015@sdu.edu.cn

anisms are still insufficient. In this research, shield muck sourced from the Jiluo Road Yellow River Tunnel Project was adopted as the primary raw material. Fly ash and straw were separately incorporated as admixtures to fabricate three types of ceramsite, namely pure muck ceramsite, fly ash composite ceramsite and straw composite ceramsite. The effects of sintering temperature, holding time and material proportion on the key properties of the prepared ceramsite, including loss on ignition (LOI), bulk density and compressive strength, were systematically investigated, combined with scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and nuclear magnetic resonance (NMR) pore tests, to reveal the internal correlation between the microstructural characteristics and macroscopic performance. The results showed that the pure muck ceramsite achieved the optimal compressive strength of 10.8 MPa at a sintering temperature of 1 100 ℃ with a particle size of no more than 10 mm. The fly ash composite ceramsite with a fly ash content of 50 wt% delivered excellent mechanical performance with a compressive strength of 18.2 MPa within the sintering temperature range of 900-1 100 ℃. In addition, the straw composite ceramsite with a straw content of 10 wt% could be successfully formed at a low temperature of 250 ℃ for a holding time of 20 min, with a water absorption rate of 27.69%. The three types of ceramsite exhibit distinctly different microstructures, which were characterized by dense structure, uniform cementitious structure and loose porous structure, respectively. The elemental composition was closely correlated with raw material components and sintering process parameters. This research provides a novel technical approach for the resource utilization of shield tunnelling muck.

**Keywords**: shield muck; ceramsite; microstructure; performance optimization; sintering process

**Received**: 2026-04-21; **Revised**: 2026-06-17; **Accepted**: 2026-07-08; **Published**: 2026-09-20

## 0　引言

盾构法因其施工效率高、对周边环境影响小等优势,已成为我国城市地铁与水下隧道建设的首选工法。然而,该工法产生的大量盾构渣土,正日益成为制约城市可持续发展的潜在灾害源。当前,渣土处置主要依赖露天堆放与远距离填埋,不仅侵占稀缺的土地资源,其运输过程中的遗撒与扬尘更会持续恶化空气质量[1-2]。此外,渣土具有含水率高、强度低、压缩性大的工程特性[3],致使其直接资源化利用困难重重。大量堆存的渣土体不仅破坏城市景观[4],其内部含有的化学改良剂可能引发土壤污染,更严重的是,在降雨、震动等外部因素诱发下,稳定性差的渣土堆极易发生崩塌、滑坡等重大工程地质灾害,深圳“12·20”特大滑坡事故即为惨痛教训[5]。因此,探索盾构渣土的高效资源化路径,是从源头削减上述环境与安全灾害的迫切需求[6]。

为破解这一难题,许多学者进行了多方向的探索。初期研究多集中于将渣土视为一种地质材料,通过物理或化学固化后用作路基填料或工程回填材料。例如,Riviera 等[7]评估了阿尔卑斯山区盾构渣土的静动力学参数以用于路基。Tanner 等[8]、郝路恺[9]介绍了渣土在路基中的应用案例。谢亦朋等[10]系统综述了渣土在填筑材料、施工辅料等方面的资源化进展。然而,这类“低附加值”利用方式难以大规模消纳渣土,且固化体的长期稳定性存在挑战。随后,研究转向“高附加值”的资源化方向,其中,将渣土烧结制备陶粒被视为一种极具潜力的解决方案[11-13]。在此方向上,张日红等[14]以粉煤灰与渣土为原料,成功制备出高强人造骨料。季维生[15]与张腾飞等[16]则分别系统研究了不同密度等级渣土陶粒的烧成工艺与参数优化。与此同时,谢发之等[17]、李海斌等[18]另辟蹊径,利用秸秆或氧化镁改性渣土,开发出用于水体除磷的功能性陶粒,拓宽了渣土利用的思路。

尽管前人研究取得了丰硕成果,但现有文献多侧重于单一配方陶粒的制备或某种特定性能的优化[19-22],现有研究尚未系统剖析粉煤灰、秸秆等外加剂在渣土陶粒中的作用规律,以及微观形貌、孔隙率与筒压强度的内在关联关系[22-25]。本研究依托济南济泺路穿黄隧道工程,以本地盾构渣土为主要原料,系统引入粉煤灰与秸秆作为外加剂,制备 3 种典型陶粒(纯渣土型、粉煤灰型、秸秆型)。本研究旨在通过系统的性能测试与微观表征,揭示材料配比与烧结制度对陶粒性能的影响机制,建立其“组成-结构-性能-应用”之间的内在联系,盾构渣土制备成陶粒再利用成为隧道工程相关领域的潜在应用前景。

## 1　试验

### 1.1　试验方案

本试验以渣土(残留化学改良剂未处理)、二级

粉煤灰（$SiO_2$ 含量 48.85%、$Al_2O_3$ 含量 35.72%、$Fe_2O_3$ 含量 4.33%、CaO 含量 4.28%）、玉米秸秆粉（<50 目）和自来水为原材料。参考现有渣土陶粒研究的常用参数范围[15-16]，选取烧结温度（800、900、1 000、1 100 ℃，秸秆陶粒为 200、250、300、400、500 ℃）、粒径大小（小粒径≤10 mm、10 mm<大粒径≤20 mm）、烧结时间（10、20、30、40 min）及材料配比作为主要影响因素，如表 1 所示。

表 1 试验变量表

Table 1 Table of experimental variables

| 序号 | 组别 | 烧结温度/℃ | 烧结时间/min | 秸秆质量分数/% | 粉煤灰质量分数/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 纯渣土（小粒径≤10 mm） | 800、900、1 000、1 100 | 20 | 0 | 0 |
| 2 | 纯渣土（10 mm<大粒径≤20 mm） | 800、900、1 000、1 100 | 20 | 0 | 0 |
| 3 | 粉煤灰∶渣土=1∶1（小粒径） | 800、900、1 000、1 100 | 20 | 0 | 50 |
| 4 | 秸秆粉∶渣土=1∶9（小粒径） | 200、250、300、400、500 | 20 | 10 | 0 |
| 5 | 粉煤灰∶渣土=3∶7（小粒径） | 900 | 10、20、30、40 | 0 | 30 |
| 6 | 粉煤灰∶渣土∶秸秆=3∶7∶$X$（小粒径） | 500 | 20 | 2.5、5、7.5、10 | 30 |

试验流程如下：首先将原材料按设计质量比称量后充分研磨混合，加入适量水搅拌均匀；然后通过成球造粒机制备球形生料球；将生料球在 105 ℃下烘干 24 h 后，置于马弗炉中按设定参数烧结；烧结完成后随炉冷却至室温，得到陶粒试样。对性能不达标的试样，调整参数后重复制备。通过烧失量、堆积密度、表观密度、吸水率、筒压强度等宏观性能测试，以及扫描电子显微镜（scanning electron microscope，SEM）、能谱仪（energy dispersive spectroscopy，EDS）、孔隙率检测仪等设备进行微观表征，系统研究盾构渣土资源化制备陶粒的机理与性能，技术路线如图 1 所示。

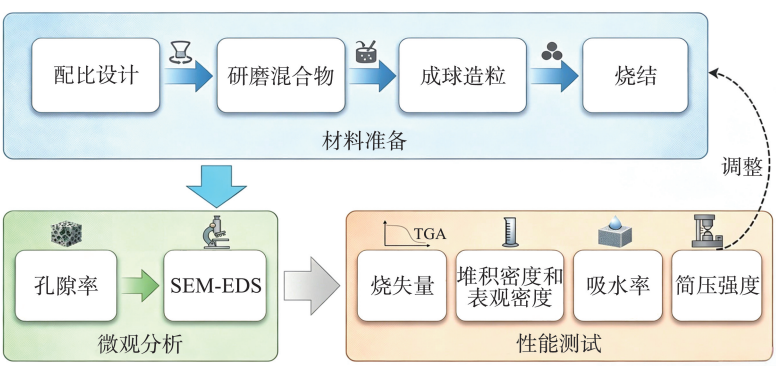



图 1 技术路线图

Fig.1 Technology roadmap

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 烧失量测定

测量烘干后未烧结生料球的质量 $m_0$，待各组陶粒在设定温度烧结完成并冷却至室温后，测定其质量 $m_1$，则烧失量 $L_{oi}$ 表示为

$$L_{oi}=[(m_0-m_1)/m_0]\times 100\%。\tag{1}$$

### 1.2.2 堆积密度测定

将陶粒自然填满已知容积 $V$ 的标准试模，刮平后称量陶粒质量 $m_b$，以两次平行试验的平均值作为该陶粒的堆积密度值 $\rho_b$，表达式为

$$\rho_b=m_b/V。\tag{2}$$

### 1.2.3 吸水率

将待测陶粒试样在 105 ℃下烘干至恒重，称量其质量 $m_d$，然后放入足量去离子水中浸泡 1 h，取出后用湿毛巾擦干颗粒表面水分，称量其质量 $m_w$，则 1 h 吸水率 $W$ 表示为

$$W=(m_w-m_d)/m_d\times 100\%。\tag{3}$$

### 1.2.4 筒压强度

采用压力试验机进行筒压强度测试，将陶粒试样装入标准承压筒内，轻轻捣实后放置冲压模。压力机以 30~50 kg/s 的速率匀速加荷，当冲压模压入承压筒深度达 20 mm 时，记录此时的压力值 $P$。筒压强度 $f_c$ 的表达式为

$$f_c=P/F,\tag{4}$$

式中 $F$ 为冲压模的承压面积。

### 1.2.5 孔隙率测试

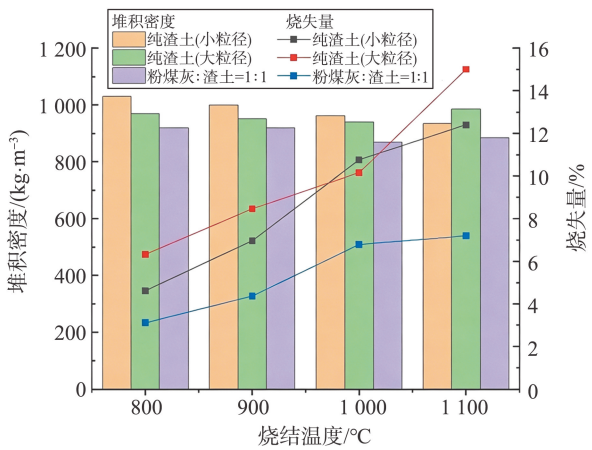
采用苏州纽迈分析仪器股份有限公司生产的 MacroMR12-150H-I 型核磁共振孔隙度分析仪进行孔隙率测试。饱水处理参数如下：将试件放置于饱水装置样品仓内，抽真空至-0.1 MPa 并

保持 30 min,然后缓慢注入去离子水至完全浸没试件,继续加压至 0.5 MPa 并保持 2 h,确保试件充分饱水。取出试样,擦净颗粒表面液体后放入核磁共振仪中,调整参数进行测试,获得孔隙率及孔径分布数据。根据国际纯粹与应用化学联合会的分类标准[26],结合本研究测试结果,将孔隙分为:微孔(<2 nm)、中孔(2~50 nm)、大孔(>50 nm)。

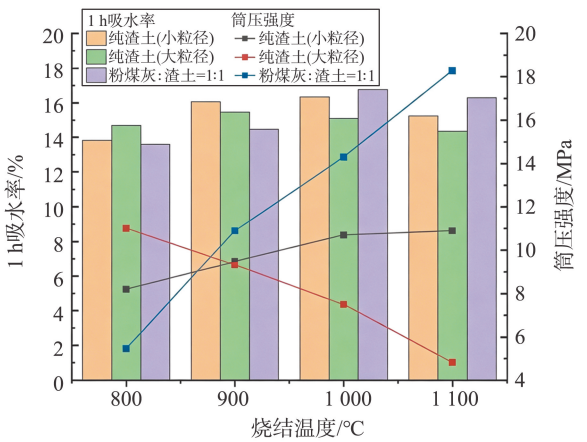
## 2　结果分析

### 2.1　烧结温度对陶粒性能的影响

选用不同粒径的纯渣土陶粒和粉煤灰质量分数为 50%的混合陶粒,在烧结时间为 20 min,烧结温度分别为 800 ℃、900 ℃、1 000 ℃、1 100 ℃的条件下,对比分析其各项性能指标,如图 2 所示。




(a) 堆积密度和烧失量影响




(b) 1 h吸水率和筒压强度影响

图 2　烧结温度对纯渣土型陶粒及粉煤灰型陶粒堆积密度、烧失量、1 h 吸水率和筒压强度的影响

Fig.2　Effects of sintering temperature on bulk density, loss on ignition, 1-hour water absorption, and cylinder compressive strength of pure waste soil ceramsite and fly ash ceramsite

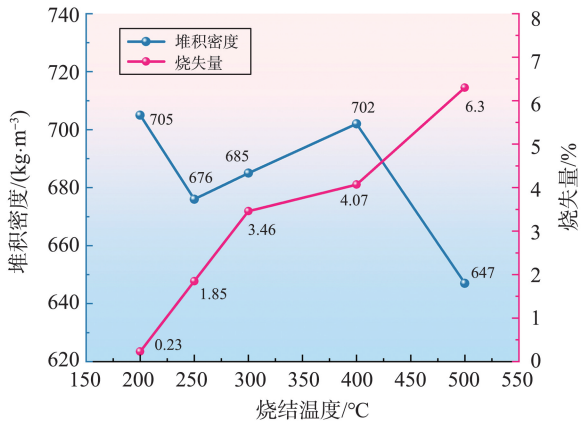
图 2(a)的结果表明,随烧结温度增加,不同粒径的纯渣土陶粒、粉煤灰陶粒的堆积密度在 1 000 ℃前均呈递减趋势(降幅小于 10%);且不同陶粒烧失量均随烧结温度的升高而增加(增幅大于 75%),这是由于陶粒内部的有机质、碳酸盐等产气成分随温度升高进一步分解,释放 $CO_2$、$H_2O$ 等气体,使得陶粒体积逐渐膨胀,进而导致堆积密度降低。而这种由固相向气相的转化也会导致陶粒烧失量的增加。

由图 2(b)可以看出,3 种陶粒材料的 1 h 吸水率随烧结温度的升高均呈现先增加再减小的趋势,但整体波动幅度不大。小粒径纯渣土陶粒筒压强度前期随温度升高而略有增加,后期趋于稳定;而大粒径渣土陶粒随烧结温度不断升高筒压强度明显降低。这是因为小粒径渣土内部结构相对大粒径来说连接更为紧密,且大粒径渣土陶粒在烧结温度过高时外表面可能发生开裂,导致强度降低。粉煤灰陶粒的筒压强度随温度升高而不断增加,这是由于高温促进了粉煤灰中 $SiO_2$、$Al_2O_3$ 与渣土中 CaO 的火山灰反应,生成更多胶凝物质,提高了颗粒间的黏结强度。

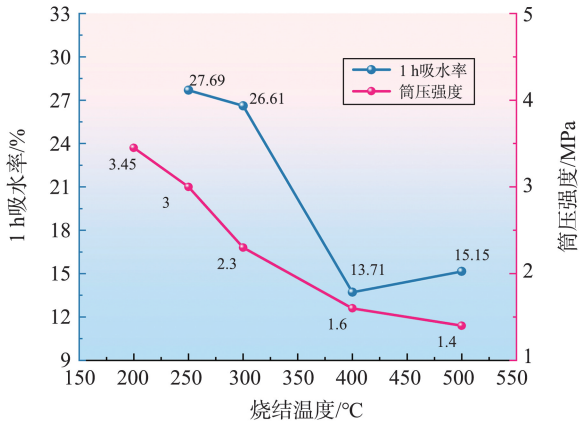
选用秸秆粉:渣土=1:9的秸秆陶粒,分析不同烧结温度对陶粒材料性能的影响。控制烧结时间为 20 min,烧结温度分别为 200、250、300、400、500 ℃,其各项性能指标如图 3 所示。

从图 3(a)中可以看出,随温度升高,掺入秸秆粉陶粒的堆积密度虽然上下波动但幅度不大,但相较于前文提到的纯渣土型陶粒和粉煤灰型陶粒来说大幅减小;而烧失量随烧结温度逐渐升高,这是由于掺入的秸秆粉自身热值高,烧失量大导致的。

图 3(b)中,除在 200 ℃时陶粒被泡开无数据外(多次试验均显示 200 ℃时陶粒成型性能差),秸秆型陶粒的吸水率随温度升高而显著减小。这是因为随着温度升高,秸秆烧失量增加,可能是陶粒内部结构微裂纹闭合,降低了连通孔隙的比例,导致陶粒的吸水率随温度升高而显著降低;同时随着温度升高,渣土中的黏土矿物开始固相颗粒间初步重排,封闭了部分连通孔隙,使得吸水率进一步降低。筒压强度随温度升高明显降低,这是因为秸秆陶粒的强度主要来源于渣土颗粒间的黏结作用,烧结温度越高,秸秆被烧除量越大,陶粒内部的骨架结构被破坏,导致筒压强度降低。




(a) 堆积密度和烧失量影响




(b) 1 h吸水率和筒压强度影响

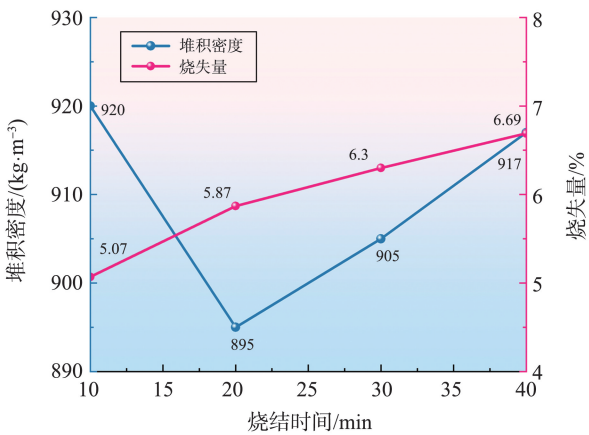
图 3 烧结温度对秸秆陶粒堆积密度、烧失量、1 h 吸水率和筒压强度的影响

Fig.3 Effects of sintering temperature on bulk density, loss on ignition, 1-hour water absorption, and cylinder compressive strength of straw ceramsite

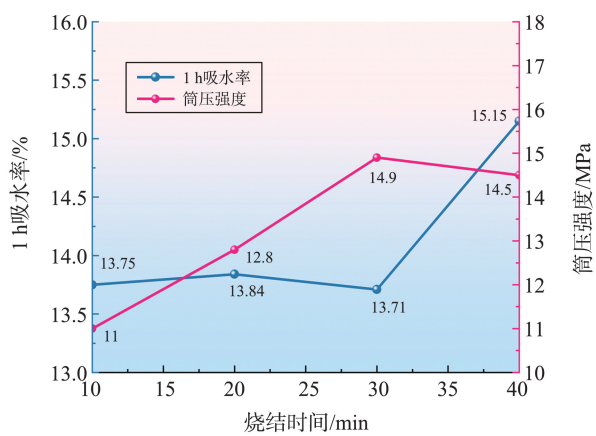
综合考虑成型性能、吸水率和筒压强度,当烧结温度为 250 ℃、烧结时间 20 min 时,质量分数 10%秸秆型陶粒既能保持良好的成型性(200 ℃时无法成型),又能维持一定的结构强度(3 MPa)和较高的吸水率(27.69%),3 项指标较为均衡。

## 2.2 烧结时间对陶粒性能的影响

选用粉煤灰和渣土质量分数为 3∶7的混合型粉煤灰陶粒,设定烧结温度为 900 ℃,研究烧结时间分别为 10、20、30、40 min 时,粉煤灰陶粒性能的变化情况,结果如图 4 所示。




(a) 堆积密度和烧失量影响




(b) 1 h吸水率和筒压强度影响

图 4 烧结时间对粉煤灰陶粒堆积密度、烧失量、1 h 吸水率和筒压强度的影响

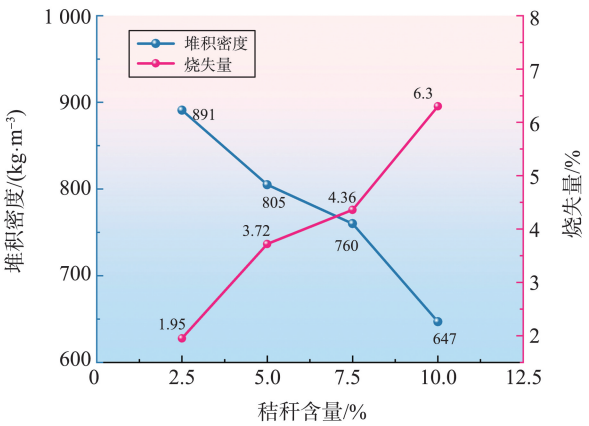
Fig.4 Effect of sintering time on bulk density, ignition loss, 1-hour water absorption, and cylinder compressive strength of fly ash ceramsite

由图 4(a)可知,随烧结时间增加,粉煤灰陶粒的堆积密度先迅速降低近 3%,并于 20 min 时达到最小,后随烧结时间增加快速增长;烧失量随时间不断增长,但增幅不大(小于 3%)。由图 4(b)可知吸水率整体呈现先减后增的态势;筒压强度在烧结时间达到 30 min 前不断增长,而后略有减小。在烧结过程中,原料中的有机质分解、碳酸盐类矿物分解会产生 $CO_2$、$H_2O$ 等气体。当烧结时间适中(20~30 min)时,这些气体缓慢逸出,使陶粒内部形成均匀的微孔结构,同时固相反应充分进行,颗粒间形成稳定的胶凝结构,陶粒表面形成致密的玻璃质包裹层,封闭了部分连通孔隙,因此强度升高,吸水率减小。当烧结时间过短,固相反应不充分,颗粒间黏结力弱;烧结时间过长,气体过度逸出,陶粒内部结构坍塌,连通孔隙打开,导致强度降低、吸水率增大。

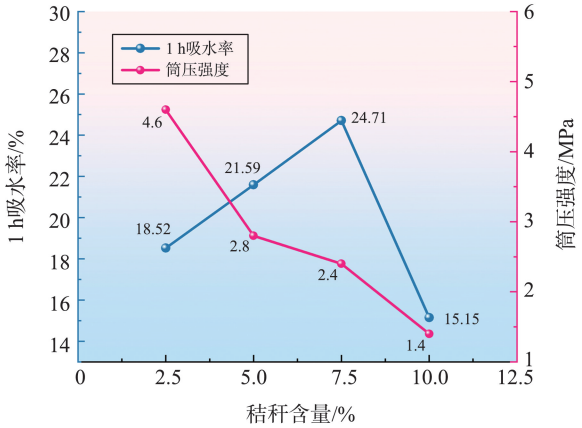
综合强度和吸水率性能指标,烧结时间为 20 min至 30 min 时,吸水率较相对稳定(13%左右),同时保证陶粒具有良好的物理力学性能(筒压强度≥12.8 MPa)。

## 2.3 秸秆粉质量分数对陶粒性能的影响

在烧结温度 500 ℃、烧结时间为 20 min 的情况下,研究秸秆粉质量分数分别为 2.5%、5%、7.5%、10%时秸秆型陶粒各项性能的变化,试验结果如图 5 所示。




(a) 堆积密度和烧失量影响




(b) 1 h吸水率和筒压强度影响

图 5　秸秆粉质量分数对陶粒堆积密度、烧失量、1 h 吸水率和筒压强度的影响

Fig.5　Effect of straw powder mass fraction on bulk density, ignition loss, 1-hour water absorption, and cylinder compressive strength of ceramsite

分析图 5(a)可知,陶粒的堆积密度随秸秆粉质量分数从 2.5%增加到 10%时,从 891 kg/m$^3$ 降低至 647 kg/m$^3$,降幅约 27%;烧失量从 1.95%升高至 6.3%,增幅约 223%。烧失量变化说明当秸秆粉含量少时,秸秆型陶粒性质趋于稳定,因此在秸秆型陶粒制备过程中,秸秆粉主要起调整内部结构、控制密度的作用,不宜掺加过多。

由图 5(b)可知,秸秆型陶粒 1 h 吸水率随秸秆粉质量分数增加而升高,在秸秆粉质量分数为 7.5%时达到最大;筒压强度随质量分数增加不断减小,最大强度也低于 5 MPa,说明秸秆粉质量分数增多会削弱陶粒的筒压强度和整体稳定性,秸秆量过多甚至会导致秸秆型陶粒在泡水时散开。根据秸秆型陶粒吸水性强但颗粒强度和耐性较差的特性,从陶粒的利用角度考虑,可以将其用为吸附性或者装饰性工具,不适合在土木工程中充当承重或抗压材料。

### 2.4　材料配比对陶粒力学性能的影响

为系统分析材料配比对陶粒力学性能的影响,对比了纯渣土、粉煤灰质量分数 50%以及秸秆质量分数 10% 的陶粒在各自最优烧结参数下的筒压强度,结果如下。

(1)纯渣土陶粒(1 100 ℃,20 min):10.8 MPa。

(2)粉煤灰质量分数 50% 陶粒(1 100 ℃,20 min):18.2 MPa。

(3)秸秆质量分数 10% 陶粒(500 ℃,20 min):1.4 MPa。

可以看出,粉煤灰的掺入显著提高了陶粒的力学强度,这是因为粉煤灰中富含的 $SiO_2$ 和 $Al_2O_3$ 在烧结过程中与渣土中的 CaO 发生火山灰反应,生成水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝物质,显著提高了颗粒间的黏结强度。而秸秆粉作为造孔剂,在烧结过程中烧失形成大量孔隙,削弱了陶粒的骨架结构,因此力学强度大幅降低。

### 2.5　SEM 和 EDS 能谱测试

对试验样品进行 SEM 电镜扫描和 EDS 检测,观察陶粒材料内部结构和元素含量。总体可得到陶粒内部结构多呈蜂窝状或絮带状,Ca、Si、O 整体含量较高,具体如图 6~11 所示。

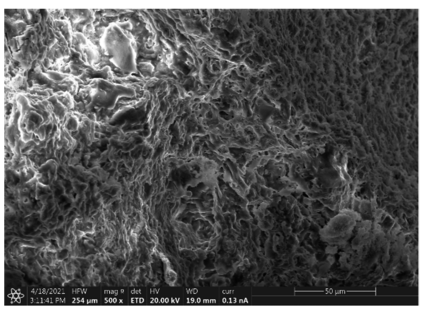


图 6　纯渣土陶粒内部结构图

Fig.6　Internal structure of pure muck ceramsite

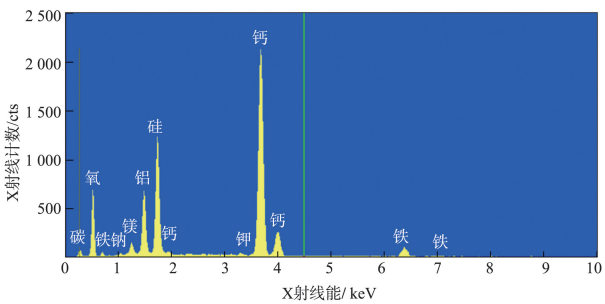



图 7　纯渣土陶粒能谱显示图

Fig.7　EDS spectrum of pure muck ceramsite

图 6、8、10 分别为纯渣土型陶粒材料、粉煤灰型陶粒材料以及秸秆型陶粒材料的内部微观结构图,从图 6 中可知,纯渣土型陶粒颗粒连接性好,空隙较少,伴有少量大颗粒,与其筒压强度大(近 11 MPa)相对应;图 8 中粉煤灰型陶粒颗粒呈球状,颗粒较小且颗粒之间呈胶凝状连接,所以宏观表现出筒压强度较大(超 18 MPa),同时,空隙较小,且分布均匀,

表明材料有一定的吸水性,结构稳定性较好;图 9 中秸秆型陶粒材料特殊,结构松散,相邻颗粒间空隙较大且连接性差,因此秸秆型陶粒在几种陶粒类型中,吸水性最强且强度最低。

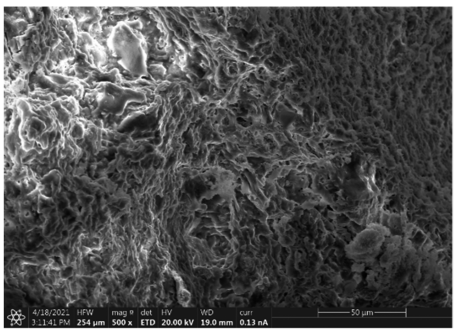


图 8 粉煤灰型陶粒内部结构图

Fig.8 Internal structure of fly ash ceramsite

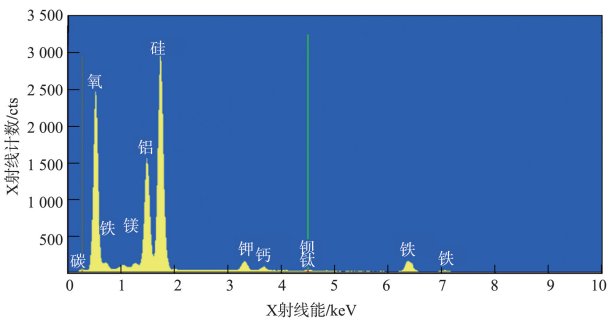



图 9 粉煤灰型陶粒能谱显示图

Fig.9 EDS spectrum of fly ash ceramsite

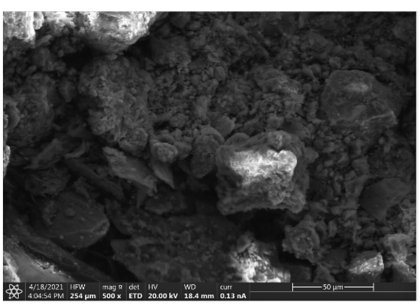


图 10 秸秆型陶粒内部结构图

Fig.10 Internal structure of straw ceramsite

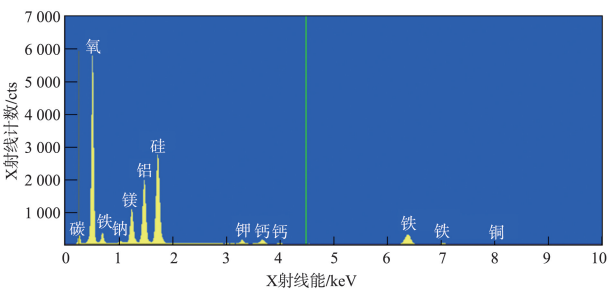



图 11 秸秆型陶粒能谱显示图

Fig.11 EDS spectrum of straw ceramsite

图 7、9、11 分别为几种陶粒试件上某点的能谱显示与元素分析:图 7 中观察可知纯渣土型陶粒经高温烧结后 Ca 元素占比较高,与穿黄隧道特殊环境中 Ca 含量多相吻合,推断烧制过程生成了稳定的 Ca 类化合物,其他元素均符合常规构成;图 9 中粉煤灰型陶粒主要组成为 Si、O、Al,其 Si 元素来源于粉煤灰材料中的各类含 Si 物质,在烧结时生成大量 $SiO_2$ 物质,反应主要发生在无机元素间,未破坏结构稳定性,且烧结后黏结性进一步增强,强度优于纯渣土陶粒;图 11 中 O 元素含量突出,与常规显示存在差异,推断在高温烧结时发生氧化反应,物质性质产生改变,各项性能不稳定;粉煤灰和秸秆的陶粒中 Ca 含量远低于纯渣土,原因是选取粉煤灰和秸秆重点分布区域,其 Ca 含量低,但 Si 和 O 含量高。

## 2.6 孔隙率测试

### 2.6.1 烧结温度对孔径分布的影响

选用渣土:粉煤灰 = 1:1,烧结温度分别为 800、900、1 000 ℃的粉煤灰型陶粒进行孔隙率测试,研究不同烧结温度对于陶粒孔径分布及孔隙率的影响,如图 12 所示。

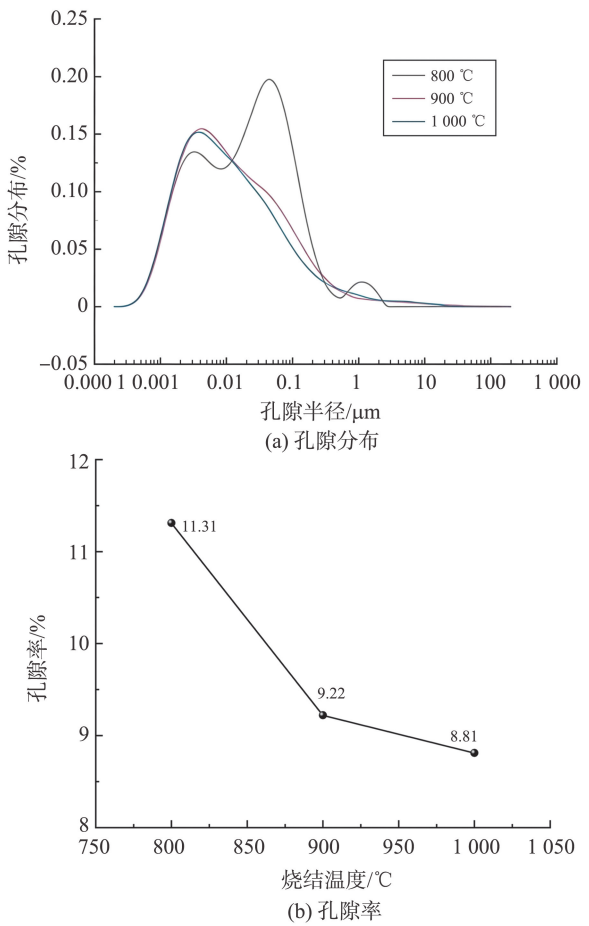



图 12 不同烧结温度下陶粒孔隙半径分布及孔隙率变化

Fig.12 Under different sintering temperatures, the pore radius distribution and porosity variation of ceramsite

由图 12(a)可知,随烧结温度的升高,粉煤灰型陶粒的孔隙率不断减少,在 800 ℃时,孔隙半径分布不一,陶粒内半径为 0.003、0.04 μm 左右的孔隙较多,温度为 900、1 000 ℃时,不同孔隙半径的分布曲

线基本重合,大部分孔隙半径集中在 0.004 μm 左右,由此可见烧结温度的升高在一定程度上可以使陶粒内部的孔隙半径减小,使陶粒内部结构更为致密,但是达到一定程度后孔隙半径变化趋于平缓。由图 12(b)可知,随着烧结温度的增加,孔隙率减小,可能是高温反映充分,生成的产物填充了部分孔隙。

### 2.6.2　粉煤灰质量分数对孔径分布的影响

选用纯渣土陶粒、粉煤灰质量分数分别为 1∶1 和 3∶7的粉煤灰型陶粒进行孔隙率测试,研究粉煤灰质量分数对孔隙分布的影响。试验还测定了粉煤灰∶渣土∶秸秆=3∶7∶0.5 的秸秆型陶粒的孔隙率,研究了少量秸秆粉掺入对粉煤灰陶粒的影响,如图 13 所示。

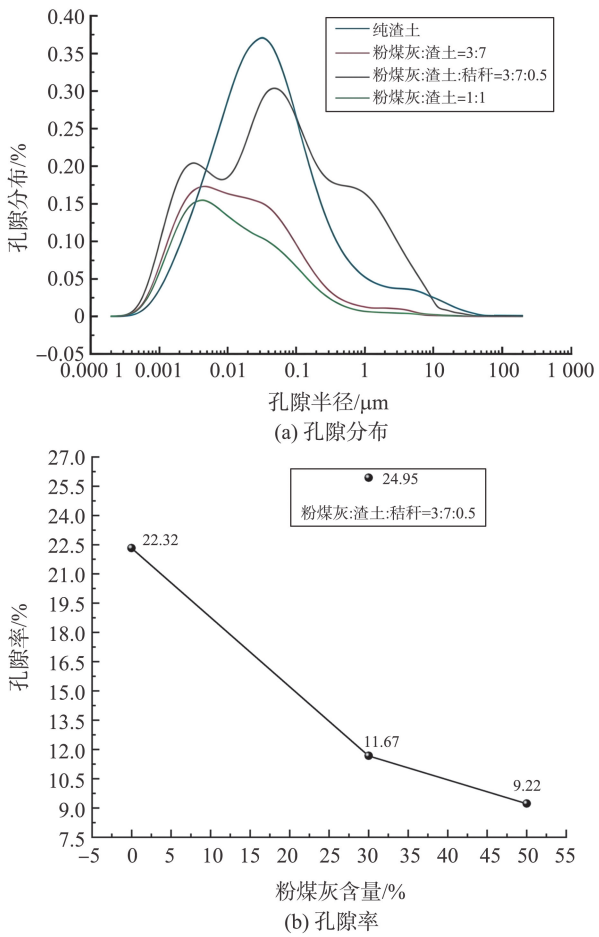



图 13　不同粉煤灰含量下陶粒孔隙半径分布及孔隙率变化

Fig.13　Under different fly ash dosages, the pore radius distribution and porosity variation of ceramsite

由图 13(a)可知,纯渣土陶粒内半径为0.03 μm 左右的孔隙含量最多,当在其中掺入粉煤灰后,孔隙分布发生了明显变化,孔隙半径基本集中在0.001~0.01 μm 之间;而且随着粉煤灰质量分数的增加,陶粒颗粒的孔隙率不断减小,但陶粒内部的小半径孔隙数量增多,主要集中在 0.004 μm 和 0.036 μm 附近。当在粉煤灰型陶粒中掺入少量秸秆时,陶粒孔隙率明显高于仅掺入粉煤灰的陶粒,且内部孔隙半径大小不一,虽然半径为 0.1 μm 的孔隙占据主导,但陶粒内部出现了半径 1 μm 左右的较大孔隙,且比例较大,说明秸秆的掺入可能对陶粒内部结构产生了不利影响。由图 13(b)可知,随着粉煤灰质量分数的增加,孔隙率逐渐降低,但是掺有秸秆的陶粒能显著增加孔隙率,相同粉煤灰质量分数下,添加秸秆孔隙率增加 114%(不掺秸秆孔隙率 11.67%,掺秸秆孔隙率 24.95%)。

### 2.7　微观机理与变形机制分析

从变量影响机制来看,3 类陶粒的性能差异主要由原材料组成和烧结工艺共同决定。

(1)烧结温度的影响:低温下(<900 ℃)主要发生脱水和有机质分解反应,孔隙率高、强度低;中高温下(900~1 100 ℃)黏土矿物发生相变,生成莫来石、石英等晶相,同时粉煤灰与渣土发生火山灰反应,生成胶凝物质,使结构逐渐致密,强度提高。

(2)粉煤灰质量分数的影响:粉煤灰作为活性掺合料,提供了大量的 $SiO_2$ 和 $Al_2O_3$,促进了胶凝相的生成,使颗粒间连接更紧密,孔隙率降低,强度提高。

(3)秸秆质量分数的影响:秸秆作为有机造孔剂,在烧结过程中烧失形成孔隙,使陶粒密度降低,吸水率提高,但同时也削弱了骨架结构,导致强度降低。秸秆质量分数过高会使陶粒内部形成连通大孔,结构稳定性变差。

在变形机制方面,纯渣土陶粒的破坏主要表现为颗粒间的脆性断裂,破坏面平整;粉煤灰陶粒由于胶凝相的存在,破坏形式为延性破坏,破坏过程中出现明显的塑性变形;秸秆陶粒则表现为脆性破碎,孔隙坍塌,破坏时产生大量碎屑。

## 3　结论

本研究系统研究了以穿黄隧道盾构渣土为原料制备的 3 类陶粒(纯渣土型、粉煤灰复合、秸秆复合),通过宏观性能测试与微观结构分析,明确了其性能调控机理,并探讨了其在隧道工程相关领域的潜在应用前景,得出以下结论。

(1)纯渣土型陶粒在 1 100 ℃烧结时可获得最优的筒压强度(10.8 MPa)与结构稳定性,且小粒径(≤10 mm)样品性能优于大粒径样品,可作为轻质填筑材料,用于隧道洞口边坡回填、软基换填等工程场景。

(2)粉煤灰型陶粒在 900~1 100 ℃的宽温度区间内表现出优异的综合性能,当粉煤灰质量分数为 50% 时,筒压强度可达 18.2 MPa,其良好的物理力学性能使其适合用作地下工程现浇混凝土的轻质骨料或预制构件的填充料。

(3)质量分数 5% 的秸秆型陶粒在 250 ℃、20 min 的低温短时烧结条件下可成功制备,具有较高的吸水率(21.59%)和孔隙率(24.95%),但力学强度较低(2.8 MPa)。该类陶粒可作为过滤吸附介质,用于隧道施工涌水的净化处理,也可作为生态种植基材。

(4)微观机理表明,3 类陶粒的性能差异根植于其迥异的微观结构:纯渣土陶粒致密,粉煤灰陶粒呈均匀胶凝状,秸秆陶粒则松散多孔。EDS 分析进一步揭示了其元素组成(分别富含 Ca、Si、O)与原材料和烧结工艺的因果关系,为定向设计与性能调控提供了理论依据。

**参考文献:**


[1] 王盼盼, 孙津津, 张培冉, 等. 盾构渣土基免烧陶粒的制备与性能优化研究[J]. 硅酸盐通报, 2026, 45(1): 237-245.
Wang Panpan, Sun Jinjin, Zhang Peiran, et al. Preparation and performance optimization of shield mud-based non-sintered ceramsite[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2026, 45(1): 237-245.

[2] 曾长女, 王子正, 曹硕倩, 等. 基于盾构渣土改良的流动化回填土的工程性能研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2023, 5(4): 1-8.
Zeng Changnü, Wang Zizheng, Cao Shuoqian, et al. Engineering performance of flowable backfill soil based on shield muck[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2023, 5(4): 1-8.

[3] 苏国君, 龚秋明, 周小雄, 等. 基于皮带出渣图像识别渣土含水率区间[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(3): 73-81.
Su Guojun, Gong Qiuming, Zhou Xiaoxiong, et al. Identifying the water content interval of muck based on the image of belt slag[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(3): 73-81.

[4] 林珊, 夏星宇, 阮艳妹, 等. 盾构渣土资源化处理与多元化应用[J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(3): 14-17.
Lin Shan, Xia Xingyu, Ruan Yanmei, et al. Resource utilization and diversified application of shield tunneling slag[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2024, 31(3): 14-17.

[5] Yin Yueping, Li Bin, Wang Wenpei, et al. Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization[J]. Engineering, 2016, 2(2): 176-216.

[6] 康靖宇, 宋旭艳, 陈家凡. 利用工程渣土制备轻质陶粒的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2025, 52(2): 89-94.
Kang Jingyu, Song Xuyan, Chen Jiafan. Experimental study on the preparation of lightweight ceramsite by using engineering muck[J]. New Building Materials, 2025, 52(2): 89-94.

[7] Riviera P P, Bellopede R, Marini P, et al. Performance-based re-use of tunnel muck as granular material for sub-grade and sub-base formation in road construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 160-173.

[8] Tanner S, Katra I, Argaman E, et al. Erodibility of waste (loess) soils from construction sites under water and wind erosional forces[J]. Science of the Total Environment, 2018, 616/617: 1524-1532.

[9] 郝路恺. 多孔渣土质陶粒泡沫混凝土的收缩性能及传热行为研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2024:19-38.
Hao Lukai. Study on the shrinkage performance and heat transfer behavior of foam concrete incorporating excavated soil based porous ceramsite[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2024: 19-38.

[10] 谢亦朋, 张聪, 阳军生, 等. 盾构隧道渣土资源化再利用技术研究及展望[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(2): 188-207.
Xie Yipeng, Zhang Cong, Yang Junsheng, et al. Research and prospect on technology for resource recycling of shield tunnel spoil[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(2): 188-207.

[11] 王磊, 王沛贞. 高性能陶粒混凝土在绿色屋面建筑中的应用[J]. 佛山陶瓷, 2026, 36(2): 173-175.

[12] 谢正奋, 汤永学. 基于建筑渣土烧制的陶粒制备加气增强型隔热节能砌块研究[J]. 广东建材, 2026, 42(2): 7-10.
Xie Zhengfen, Tang Yongxue. Study on the preparation of aerated, enhanced thermal insulation and energy-saving blocks based on construction waste soil firing with ceramic[J]. Guangdong Building Materials, 2026, 42(2): 7-10.

[13] 曹志刚, 庄峻淇, 李靖, 等. 碱激发矿渣固化淤泥质渣土的高强耐水人工造粒试验研究[J]. 中国公路学报, 2026,3(4):49-62.
Cao Zhigang, Zhuang Junqi, Li Jing, et al. Experimental study on high-strength and water-resistant artificial granulation of alkali activated slag solidified sludge soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2026,3(4):49-62.

[14] 张日红, 明维, 万文豪, 等. 粉煤灰-渣土人造骨料的

高强化制备与微结构表征[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(8): 2819-2827.
Zhang Rihong, Ming Wei, Wan Wenhao, et al. Manufacture and microstructural characterization of fly ash-muck artificial aggregates with high strength[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(8): 2819-2827.

[15] 季维生. 700 密度等级渣土陶粒制备及其性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(7): 2209-2214.
Ji Weisheng. Preparation and performance of 700 density grades muck-ceramsite [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(7): 2209-2214.

[16] 张腾飞, 荣辉, 刘志华, 等. 900 密度等级渣土陶粒的制备及性能研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(1): 109-113.
Zhang Tengfei, Rong Hui, Liu Zhihua, et al. Research on preparation and properties of muck ceramsite for 900 density level [J]. New Building Materials, 2017, 44(1): 109-113.

[17] 谢发之, 李海斌, 李国莲, 等. 盾构渣土基碳复合陶粒的制备及除磷性能[J]. 应用化学, 2017, 34(2): 211-219.
Xie Fazhi,LI Haibin,LI Guolian,et al. Phosphate removal by using shield residues/carbon composite ceramsite [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2017, 34(2): 211-219.

[18] 李海斌, 谢发之, 宣寒, 等. 氧化镁/地铁渣土复合陶粒的制备及除磷性能研究[J]. 应用化工, 2015, 44(9): 1581-1585.
Li Haibin, Xie Fazhi, Xuan Han, et al. Phosphate removal by using magnesium oxide/construction waste of subway composite ceramsite [J]. Applied Chemical Industry, 2015, 44(9): 1581-1585.

[19] 李耀东, 唐波, 张桂新, 等. 陶粒泡沫混凝土强度概率分布特性分析[J/OL]. 宁波大学学报(理工版), (2026-03-18). https://link.cnki.net/urlid/33.1134.N.20260317.1618.001
Li Yaodong, Tang Bo, Zhang Guixin, et al. Analysis of the strength probability distribution characteristics of ceramsite foamed concrete[J/OL]. Journal of Ningbo University ( NSEE ) , (2026-03-18). https://link.cnki.net/urlid/33.1134.N.20260317.1618.001

[20] 郑熊泽浩, 黄永炳, 张烨, 等. 微纳米气泡水强化复合固废基免烧陶粒制备及性能研究[J]. 金属矿山, 2026(3): 306-315.
Zheng Xiongzehao, Huang Yongbing, Zhang Ye, et al. Research on preparation and properties of composite solid waste-based non-sintered ceramsite enhanced by micro-nano bubble water[J]. Metal Mine, 2026(3): 306-315.

[21] 韩旭, 许康, 张天苇, 等. 粉煤灰基陶粒的制备及其对水体中磷的吸附性能[J]. 硅酸盐学报, 2026, 54(4): 1407-1418.
Han Xu, Xu Kang, Zhang Tianwei, et al. Preparation of fly ash ceramsite and its phosphate adsorption performance[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2026, 54(4): 1407-1418.

[22] 曹志刚, 申昆鹏, 毛天学, 等. 淤泥质钻渣土碳化造粒方法及强度增长机理试验[J].中国公路学报, 2024, 37(6): 217-227.
Cao Zhigang, Shen Kunpeng, Mao Tianxue, et al. Experimental research on the carbonation granulation method for silty drilling residue and its strength growth mechanism[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(6): 217-227.

[23] 权宗刚, 陈媛媛, 刘蓉, 等. 花岗岩尾泥与渣土制备轻质陶粒的研究[J]. 新型建筑材料, 2023, 50(10): 141-144.
Quan Zonggang, Chen Yuanyuan, Liu Rong, et al. Study on the preparation of lightweight ceramisite using granite tailings and engineering waste soil [J]. New Building Materials, 2023, 50(10): 141-144.

[24] 朱卫东. 不同类型盾构渣土烧制轻质高强陶粒研究[J]. 福建建设科技, 2023(4): 54-57.
Zhu Weidong. Study on lightweight and high-strength ceramsites produced by different types of shield muck through sintering [J]. Fujian Construction Science & Technology, 2023(4): 54-57.

[25] Shen Xiang, Xu Zekai, Chen Xiangsheng, et al. Seawater-induced degradation of shield tail grease: an experimental study on property evolution and micro-mechanisms[J]. Smart Underground Engineering, 2025, 1: 92-101.

[26] Sing K S W, Everett D H, Haul R A W, et al. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984) [J]. Pure and Applied Chemistry, 1985, 57(4): 603-619.

(编辑:宋艳)