

洗选煤矸石透水混凝土的制备及其性能研究*

Study on the Preparation and Properties of Pervious Concrete of Coal Gangue for Washing

张亚鹏, 张凤娇, 曹佳伟, 冯胜雷, 孟文清

(河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 用洗选煤矸石制备透水混凝土, 通过设计三因素三水平正交试验, 探究骨料级配、水灰比、骨胶比对试件性能的影响。结果表明: 各因素对洗选煤矸石透水混凝土力学性能和透水性能的影响主次顺序一致, 均为: 水灰比 > 骨胶比 > 骨料级配; 抗压强度和透水性能二者呈负相关; 当洗选煤矸石细粗骨料比 1:1、水灰比 0.32、骨胶比 2.7 时, 28 d 抗压强度最高可达 12.11 MPa; 界面过渡区 (ITZ) 内的 CH 和 AFt 晶体相对含量较多, 为薄弱区, 更易产生裂缝, 此区域范围内水化反应程度较低; 透水混凝土的孔隙率越大, 冻融损伤程度越显著。

关键词: 洗选煤矸石; 透水混凝土; 抗压强度; 透水性能; 抗冻性

中图分类号: TU997 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 06-0001-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.001

ZHANG Yapeng, ZHANG Fengjiao, CAO Jiawei, FENG Shenglei, MENG Wenqing

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Using washing coal gangue to prepare permeable concrete, a three factor three-level orthogonal experiment was designed to investigate the effects of aggregate gradation, water cement ratio, and bone cement ratio on the performance of specimens. The results show that the influence of all factors on mechanical properties and permeable properties of washing coal gangue pervious concrete is consistent in the order of water-cement ratio > bone glue ratio > aggregate gradation; There is a negative correlation between compressive strength and water permeability; When the proportion of fine aggregate of washing coal gangue is 50%, the water-cement ratio is 0.32, and the bone glue ratio is 2.7, the 28 days compressive strength can reach 12.11 MPa. The relative content of CH and AFt crystals in interface transition zone (ITZ) area is relatively large, indicating a weak area and a higher likelihood of cracking, suggesting a lower degree of hydration reaction in this region. The larger the porosity of pervious concrete is, the more significant the freeze-thaw damage degree is.

Keywords: washing coal gangue; pervious concrete; compressive strength; water permeability; freezing resistance

0 引言

煤矸石是在产煤过程中排放的固体废弃物, 大量堆积的煤矸石造成了严重的环境污染。海绵城市的理念推动了多孔隙透水混凝土的发展, 对维护生态平衡, 实现水资源循环利用, 缓解城市“热岛效应”发挥着重要作用^[1-3]。

因此, 众多学者对透水混凝土展开研究。陈尚鸿等^[4]通过调整水胶比的大小来改变水泥浆体的流

* 基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1903602-01); 固废资源化利用与节能国家重点实验室开放基金 (SWR-2019-008)。

作者简介: 张亚鹏 (1977—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 建筑结构工程。

通信作者: 张凤娇 (1999—), 女, 硕士, 研究方向: 土木工程材料。

收稿日期: 2023-08-01

材料科学

动性, 设置水胶比范围为 0.24~0.32, 随着水胶比的提高, ASSPC (碱激发钢渣-矿渣透水混凝土) 抗压强度先增后减; 周家慧等^[5] 设置水胶比的范围在 0.26~0.32 之间, 研究表明在此范围内, 抗压强度先增后减, 水灰比过小会降低水泥浆对骨料包裹性程度, 水灰比过大易造成试件出现沉浆现象; 焦凯等^[6] 研究发现抗压强度随水胶比的增大先增后减, 需要通过调整优化水胶比获得最佳力学性能。万书金等^[7] 围绕骨料级配对透水混凝土的性能影响展开研究, 发现单一级配连续孔隙率大于混合级配, 骨料级配 (4.75~9.5 mm):(9.5~14.5 mm) 为 1:6 时, 透水混凝土抗压强度最大; 吴绍奇等^[8] 研究了骨料粒径对透水混凝土抗压强度的影响, 结果表明骨料粒径越大, 试件内部骨架强度减弱, 应力集中现象越明显; 李崇智等^[9] 的研究表明骨料级配对透水混凝土性能影响最显著, 小粒径骨料的掺入可增加骨料间接触点的数量, 能有效提高力学强度; 胡良鹏等^[10] 选用两种粒径的钢渣骨料制备透水混凝土, 研究发现骨料粒径越大试件强度越高, 小粒径骨料试件的薄弱区易形成应力集中现象; Luo 等^[11] 研究发现随着粗骨料占比的提高, 抗压强度提高, 透水系数和孔隙率降低, 且双级配试件的孔隙率和渗透系数最低。

李建华等^[12] 研究发现采用插捣或振动成型方式的混凝土强度较高, 透水性能较差, 且成型过程中易产生离析结底现象; 申明昊等^[13] 研究发现试件的破坏形式随着目标孔隙率的变化而发生转变, 主要包括骨料断裂破坏和骨料间水泥石破坏两种形式; 朱燕飞等^[14] 将透水混凝土的透水系数与抗压强度之间的关系进行指数拟合, 研究表明, 二者呈负相关性。此外, 一些学者结合宏观和微观分析透水混凝土的影响因素, 揭示出其对力学强度、透水系数及内部孔隙结构变化的规律^[15-16]。

为了节约天然骨料的用量, 提高大宗固体废弃物的利用率, 结合透水混凝土的研究现状, 选取洗选煤矸石制备透水混凝土。试验以洗选煤矸石为骨料, 以骨料级配、水灰比、骨胶比为因素, 透水混凝土性能指标为研究对象, 进行正交设计, 探究试件最佳配合比; 通过极差分析, 分析各因素对试件性能的影响。研究成果可为洗选煤矸石透水混凝土

的进一步实际应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 原材料

洗选煤矸石透水混凝土主要由水泥、煤矸石骨料、水和减水剂按一定配合比拌合而成。

水泥采用 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥, 其主要参数指标见表 1; 骨料选取 2.36~9.5 mm 连续颗粒级配的洗选煤矸石, 主要化学成分和性能指标见表 2、表 3; 减水剂采用聚羧酸系综合型减水剂 (OM303), 用量 0.7%; 拌合水为自来水。

表 1 水泥主要参数指标

Table 1 Cement main parameter index

项目	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
规定值	≥45	≤600	≥17.0	≥42.5	≥3.5	≥6.5
检测值	190	250	30.4	47.5	6.1	8.9

表 2 洗选煤矸石化学成分表

Table 2 Chemical composition of washing coal gangue /%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MgO	其他
57.55	26.90	5.31	3.01	2.99	1.56	0.97	1.71

表 3 洗选煤矸石性能指标

Table 3 Performance indexes of washing coal gangue

粒径/mm	紧密堆积密度/(kg/m ³)	表观密度/(kg/m ³)	空隙率/%	压碎指标/%	吸水率/%
2.36~4.75	1 380	2 530	45.45	30.48	2.53
4.75~9.50	1 465	2 565	42.88	13.34	2.45

1.2 试验方案

试验确定粗细骨料比 (A)、水灰比 (B)、骨胶比 (C) 对抗压强度和透水性能的影响, 设计 2.36~4.75 mm (细骨料) 和 4.75~9.5 mm (粗骨料) 两种骨料类型。为确保合适的浆膜厚度, 选取细粗骨料比 1:2~2:1, 水灰比区间为 [0.26, 0.32], 骨胶比为 [2.7, 3.3]。选用 L₉ (3⁴) 正交表, 试验方案见表 4。

表 4 透水混凝土正交试验方案

Table 4 Orthogonal test design of pervious concrete

序号	A (粗细比)	B (水灰比)	C (骨胶比)	D
Z1	1 (2:1)	1 (0.26)	1 (2.7)	1
Z2	1 (2:1)	2 (0.29)	2 (3.0)	2
Z3	1 (2:1)	3 (0.32)	3 (3.3)	3
Z4	2 (1:1)	1 (0.26)	2 (3.0)	3
Z5	2 (1:1)	2 (0.29)	3 (3.3)	1
Z6	2 (1:1)	3 (0.32)	1 (2.7)	2
Z7	3 (1:2)	1 (0.26)	3 (3.3)	2
Z8	3 (1:2)	2 (0.29)	1 (2.7)	3
Z9	3 (1:2)	3 (0.32)	2 (3.0)	1

1.3 试件制备

(1) 搅拌工艺：试验使用 SJD60 型搅拌机，为确保水泥浆对骨料的包裹程度，参考王宇^[17]的投料方式，采用水泥裹石投料法，制备流程见图 1。

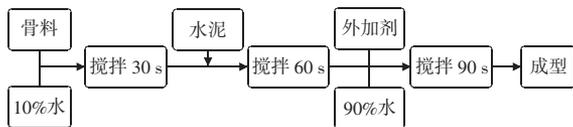


图 1 水泥裹石投料法流程图

Fig. 1 Flow chart of cement wrapped stone feeding method

(2) 成型方式：采用人工插捣和机械振捣相结合的成型工艺法。此工艺既可确保试件的密实度，强化骨料颗粒间的粘结性，同时也不影响其透水等其他特性。

(3) 养护方法：装料完毕后，覆膜养护 24 h 后脱模，然后放置于标准养护室养护。

1.4 测试方法

透水混凝土性能测试方法按 JC/T 2558—2020《透水混凝土》进行。

抗压强度：设置加载速率为 0.5 MPa/s，试件破坏时的峰值强度乘以换算系数 0.95 作为抗压强度值。

透水性能：按照定水头法的测试数据计算透水系数，有效孔隙率采用重量法。

抗冻性能：将泡水后试件冻融 25 次循环，记录冻融后试件的质量损失和强度损失。

微观分析：用场发射扫描电镜-能谱仪，对水化产物及界面过渡区 (ITZ) 进行观察。

2 结果与分析

2.1 试验结果

1 m³ 洗选煤矸石透水混凝土配合比及相关性能试验结果见表 5，对试验结果极差分析见表 6。

表 5 洗选煤矸石透水混凝土试验配合比和试验结果

Table 5 Mix ratio and results of pervious concrete with washing coal gangue

序号	细骨料 /(kg/m ³)	粗骨料 /(kg/m ³)	水泥 /(kg/m ³)	水 /kg	28 d 抗压 /MPa	透水系数 /(mm/s)	有效孔隙率 /%
Z1	1 000	500	556	131	6.69	1.709	27.0
Z2	1 000	500	500	132	8.63	1.680	27.4
Z3	1 000	500	455	132	7.51	1.634	27.8
Z4	750	750	500	117	6.95	1.692	27.7
Z5	750	750	455	118	7.40	1.862	26.9
Z6	750	750	556	164	12.11	0.678	18.2
Z7	500	1 000	455	104	3.81	1.969	30.8
Z8	500	1 000	556	147	8.91	1.524	23.5
Z9	500	1 000	500	146	8.88	0.768	19.8

表 6 极差分析表

Table 6 Range analysis table

序号	抗压强度				透水系数				有效孔隙率		
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C
k ₁	7.61	5.82	9.24	7.66	1.67	1.79	1.30	1.45	27.4	28.5	22.9
k ₂	8.82	8.31	8.15	8.18	1.41	1.69	1.38	1.44	24.3	25.9	25.0
k ₃	7.20	9.50	6.24	7.79	1.42	1.03	1.82	1.62	24.7	21.9	28.5
R	1.62	3.68	3.00	0.53	0.26	0.76	0.52	0.18	3.10	6.60	5.60

2.2 透水混凝土的力学性能

通过比较 R 值，可得影响抗压强度的顺序为：B > C > A，即：水灰比 > 骨胶比 > 骨料级配。空白列 D 的 R 值最小，证明误差列较小，试验设置合理。

随着细骨料的减少，抗压强度先增后减，在粗细骨料比为 1:1 时抗压强度获得最大值。当细骨料占比从 2:1 降低为 1:1 时，抗压强度由 7.61 MPa 提高至 8.82 MPa，提高了 15.9%。单位体积内骨料颗粒数量变少，从而总比表面积降低，在相同浆体用量下，增加了骨料表面浆体包裹厚度，因此其力学性能提高。细骨料占比从 1:1 降低为 1:2 时，抗压强度由 8.82 MPa 降低为 7.2 MPa，降低了 18.36%，因为细骨料的掺入能够增加骨料间的接触面积，从而使结构变得密实，骨料间的机械咬合力增大，所以随着细骨料的减少，混凝土抗压强度随之降低。

水灰比越大，抗压强度越高。当水灰比从 0.26 增加至 0.32 时，抗压强度提高了 63.3%，主要是因为当水灰比较小时，拌合物状态干涩，对骨料的包裹性差，容易降低水化反应程度，对抗压强度削弱较大。增大水灰比后，拌合物更易达到“手握成团，轻捏即散”的状态，此时的水泥浆能更好地包裹骨料，抗压强度提高；但当水灰比过高时，水泥浆体的流动性大，插捣振动密实成型的过程中，水泥浆体随之下沉，易堵塞孔隙造成沉浆现象。

随骨胶比的增大抗压强度呈降低趋势。骨胶比从 2.7 增加至 3.3，抗压强度降低了 32.45%，原因是骨胶比直接影响浆膜厚度。当骨胶比为 2.7 时，透水混凝土中水泥浆含量相对较多，部分填充骨料孔隙，试件更密实，提高了抗压强度。骨胶比增大，则水泥用量减少，浆膜变薄导致骨料间粘结力下降，进而抗压强度降低。

综上，抗压强度的最优组合为 A2B3C1，即：粗细骨料比 1:1、水灰比 0.32、骨胶比 2.7。

材料科学

2.3 透水混凝土的透水性能

比较极差大小, 可得影响透水系数和有效孔隙率的顺序一致, 为 $B > C > A$, 即: 水灰比 $>$ 骨胶比 $>$ 骨料级配。

随着细骨料占比的减少, 透水系数和有效孔隙率均呈现先降低后提高的趋势。在细骨料占比为 1:1 处透水系数和有效孔隙率最低。当细骨料占比从 2:1 降低为 1:1 时, 透水系数降低了 14.33%, 有效孔隙率降低了 11.43%。这是因为, 骨料总比表面积减小, 进而浆膜变厚, 且富于浆体能有效填充骨料间孔隙, 导致透水系数和有效孔隙率显著下降; 细骨料占比从 1:1 降低为 1:2 时, 透水系数提高 0.64%, 有效孔隙率提高了 1.78%, 因为颗粒越大, 骨料间接触点越少, 则空洞尺寸越大, 导致连通孔隙增多。

透水混凝土的透水系数、有效孔隙率随着水灰比的增大呈降低趋势。水灰比从 0.26 增加至 0.32, 透水系数降低了 42.63%, 有效孔隙率降低了 23.04%, 主要是因为当水灰比较小时, 整体用水量相对较少, 水泥浆体流动性越差, 对骨料的包裹性越差, 骨料间的粘结较为松散, 导致骨料之间的间距增大, 连通孔隙增多, 透水性能提高; 随着水灰比的增大, 整体用水量提高, 进而改善了水泥浆体的流动性, 使骨料之间的粘结更加紧密, 提高了试件的密实度, 透水系数和有效孔隙率急剧降低。

透水混凝土的透水系数、有效孔隙率随骨胶比的增大而增大。骨胶比从 2.7 增加至 3.3, 透水系数提高了 39.72%, 有效孔隙率提高了 24.45%, 这是因为随着骨胶比的增大, 水泥用量降低, 使骨料在成型时水泥浆体厚度减小, 骨料间的孔隙未能被适当填充, 进一步导致原来不连通的孔隙增大, 透水系数和有效孔隙率显著提高。

综上, 透水系数及有效孔隙率的最优组合为 A1B1C3, 即: 粗细骨料比 2:1、水灰比 0.26、骨胶比 3.3。

2.4 透水性能与抗压强度的关系

基于表 5 的试验数据, 对洗选煤矸石透水混凝土抗压强度和透水系数/有效孔隙率进行回归分析, 如图 2 所示。

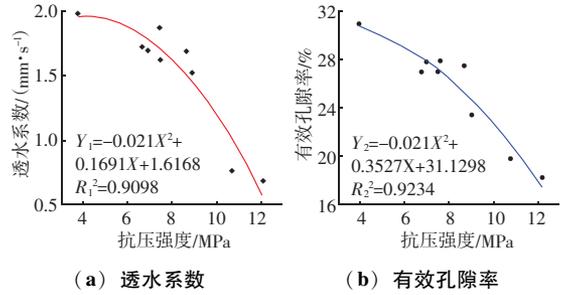


图 2 抗压强度和透水性能关系曲线图

Fig. 2 Compressive strength and water permeability relationship diagram

由图可得, 抗压强度和透水性能二者呈反比例关系, 透水系数和有效孔隙率呈正比例关系。 R_1^2 和 R_2^2 均大于 0.90, 表明抗压强度和透水性能二者呈高度相关性。

2.5 抗冻性能

洗选煤矸石透水混凝土抗冻性能测试结果如图 3 所示。洗选煤矸石透水混凝土 25 次冻融循环后的强度损失率高达 20%, 相较于普通混凝土显著提高。这是因为透水混凝土内部孔隙被水分填充, 试件受冻后, 水结成冰体积增大, 试件内部受到挤压, 随着冻融的反复循环, 试件内部产生微裂缝, 发生冻胀破坏。冻融循环后, 水泥浆体剥落, 部分骨料直接暴露在试件表面, 骨料与水泥之间的粘结力下降, 再加上洗选煤矸石骨料本身孔隙大且强度较低, 对试件强度的影响更为显著。透水混凝土表面骨料碎渣的部分剥落导致试件产生相应的质量损失。透水系数大、有效孔隙率高的试件抗冻性能相对越低, 强度损失率相对越大。

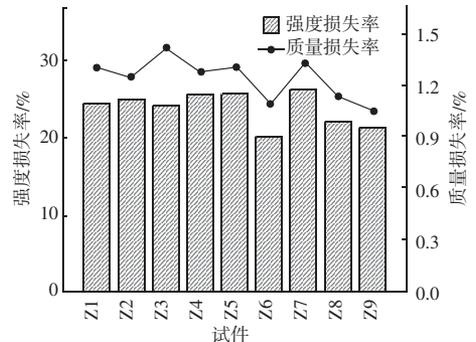


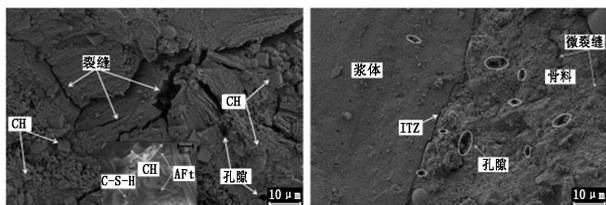
图 3 透水混凝土质量损失率和强度损失率

Fig. 3 Quality loss rate and strength loss rate of pervious concrete

2.6 微观形貌

洗选煤矸石透水混凝土的微观形貌图如图 4 所

示。试件水化产物有大量堆积重叠分布的板状晶体氢氧化钙 (CH)、无定形絮状凝胶水化硅酸钙 (C-S-H)、针状晶体水化硫铝酸钙 (AFt)。在水化作用下, 洗选煤矸石骨料内部微小孔隙得到一定的填充, 使得混凝土内部由大孔隙向小孔隙、小孔隙向微孔隙转变, 能够明显提高混凝土的致密性。但由于洗选煤矸石骨料自身具有局限性, 其压碎值相对天然骨料较大, 经抗压破坏剥落后, 试件内部存在大量明显裂缝, 微观结构较为蓬松, 是影响透水混凝土整体强度的主要因素。浆体和骨料间界面过渡区 (ITZ) 亦为薄弱区, 在微观结构下表现为疏松多孔, 说明此区域范围内的水化程度较低。是因为附着于洗选煤矸石骨料表面的杂质对水化反应有不利影响, 易使骨料表面形成一层水膜。在此液体环境下, CH 和 AFt 晶体析出较多, 胶结能力较差, 导致 ITZ 为薄弱区, 易产生裂缝造成强度破坏。



(a) 水化产物

(b) 界面过渡区

图 4 微观形貌图

Fig. 4 Microscopic morphology

3 结论

(1) 水灰比和骨胶比对试件性能影响最显著。细粗骨料比 1:1、水灰比 0.32、骨胶比 2.7 时, 可制作出强度等级满足 C10 的试件。

(2) 抗压强度越高, 透水性能越小, 二者高度显著相关; 有效孔隙率和透水系数正比例高度相关。

(3) 水化产物对骨料间孔隙能起到一定的填充作用, 在 ITZ 区域范围内水化反应不够充分, 为薄弱区。

(4) 试件抗冻性随孔隙率的增大而降低, 冻融循环条件下, 试件孔隙周围产生的微裂缝对强度影响显著。

参 考 文 献

- [1] 王旭阳, 耿适为, 王冬, 等. 海绵城市理念下市政道路排水设计及关键问题探讨 [J]. 给水排水, 2022, 58 (增刊 1): 569-573.
- [2] 石立国, 杜垚, 文韬, 等. 海绵城市建设中的透水混凝土性能及应用效果 [J]. 中国给水排水, 2019, 35 (12): 39-43.
- [3] 王玲玲, 薛姝楠, 李志明, 等. 适用于海绵城市的无砂混凝土物理力学性能研究 [J]. 混凝土, 2018 (8): 136-139.
- [4] 陈尚鸿, 林佳福, 杨政险, 等. 钢渣-矿渣透水混凝土力学性能的试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (5): 1767-1777.
- [5] 周家慧, 杨建永, 李钧. 不同因素对透水混凝土性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2022 (5): 30-33.
- [6] 焦凯, 陈晨, 李磊, 等. 基于正交试验设计的透水混凝土关键性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (6): 1839-1844.
- [7] 万书金, 李峰, 郭振东, 等. 水灰比和骨料级配对比透水混凝土性能影响的试验研究 [J]. 混凝土, 2023 (7): 188-192.
- [8] 吴绍奇, 解培睿, 乔思皓, 等. 铁尾矿骨料制备透水混凝土的试验研究 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42 (8): 100-105.
- [9] 李崇智, 任强伟, 孙箫然, 等. C40 透水混凝土配合比设计及性能研究 [J]. 材料导报, 2022, 36 (增刊 2): 209-213.
- [10] 胡良鹏, 陈徐东, 朱祥意, 等. 不同骨料粒径钢渣透水混凝土力学性能分析及离散元模拟 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (1): 69-75, 132.
- [11] LUO Y P, LV Y R, WANG D F, et al. The influence of coarse aggregate gradation on the mechanical properties, durability, and plantability of geopolymer pervious concrete [J]. Construction and Building Materials, 2023, 382: 131246.
- [12] 李建华, 杨钱荣, 张方俊. 钢渣透水混凝土制备及其影响因素研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2014 (5): 3-8.
- [13] 申明昊, 张粉芹, 许俊杰, 等. 粉煤灰对不同目标孔隙率下透水混凝土性能影响的研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (5): 61-67.
- [14] 朱燕飞, 李就好, 黄金林, 等. 无砂透水混凝土试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (4): 1006-1011, 1017.
- [15] 徐宝华, 武俊宇, 皮永豪, 等. 高强透水混凝土的制备与应用研究 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (5): 25-28.
- [16] 吴庆, 朱袁洁, 许耀, 等. 基于 SEM 和 XRD 微观测试下单掺矿物掺料透水混凝土性能分析 [J]. 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2020, 34 (3): 112-118.
- [17] 王宇. 透水混凝土配合比设计及其路用性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.