

# 基于磁化水的高钛矿渣集料混凝土 的制备及性能研究

涂闽杰

(中建海峡建设发展有限公司, 福建 福州 350014)

**摘 要:** 为了改善高钛矿渣集料混凝土的工作性及力学性能, 提出采用磁化水制备高钛矿渣集料混凝土, 研究了不同流量磁化水对高钛矿渣集料混凝土工作性、力学性能的影响规律, 并对其微观形貌及孔结构进行测试分析, 结果表明: 磁化水会改善高钛矿渣集料混凝土的工作性和强度, 增加其含气量; 但随着磁化水流量的增大, 改善效果减弱。当水流量为 40 mL/s 时, 其坍落度、扩展度、28 d 抗压强度、60 d 抗压强度较自来水高钛矿渣集料混凝土分别提升 9.5%、14.9%、8.9%、11.6%。微观测试结果表明, 磁化水高钛矿渣集料混凝土骨料与水泥基体裂纹较小, 水化产物较多, 未水化的水泥及矿物掺合料较少, 反应程度更高, 高钛矿渣骨料与水泥基体间的“销栓效应”进一步增强; 且无害孔比例较高, 有害孔比例较少, 结构更加致密, 进而强度较好。

**关键词:** 磁化水; 高钛矿渣集料混凝土; 工作性; 抗压强度; 微观结构

中图分类号: TU528.0

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)01-0094-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.01.014

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听  
语  
音  
与  
作  
者  
互  
动  
聊  
科  
研

## Study on the preparation and properties of high titanium slag aggregate concrete using magnetized water

TU Minjie

(China State Construction Engineering Corporation Strait Construction and Development Co., Ltd., Fuzhou 350014, Fujian, China)

**Abstract:** To improve the workability and mechanical properties of high titanium slag aggregate concrete, this paper proposed the use of magnetized water for its preparation. The study investigated the effects of different flow rates of magnetized water on the workability and mechanical properties of high titanium slag aggregate concrete, and conducted tests and analyses on its micro morphology and pore structure. The results show that magnetized water enhances the workability and strength of high titanium slag aggregate concrete and increases its air content. However, as the flow rate of magnetized water increases, the improvement effect diminishes. When the water flow rate is 40 mL/s, the slump, spread, 28 d compressive strength, and 60 d compressive strength are respectively increased by 9.5%, 14.9%, 8.9%, and 11.6% compared with tap water high titanium slag aggregate concrete. The microstructural test results indicate that the cracks between the aggregate and cement matrix of the magnetized water high titanium slag aggregate concrete are smaller, with more hydration products and fewer unhydrated cement and mineral admixtures, resulting in a higher degree of reaction. The "pinning effect" between the high titanium slag aggregate and the cement matrix is further enhanced. Additionally, the proportion of harmless pores is higher, and the proportion of harmful pores is lower, making the structure denser and thus stronger.

收稿日期: 2024-08-13

基金项目: 中建股份重点研发计划:《低成本建筑垃圾资源化利用关键技术与产业化应用研究》(CSCEC-2023-Z-7)。

作者简介: 涂闽杰, 男, 1984 年出生, 福建省福州人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 建筑垃圾资源化综合利用与产业化应用、装配式建筑混凝土预制构件生产与施工管理等, E-mail: 408962086@qq.com。

**Key words:** magnetized water, high titanium slag aggregate concrete, workability, compressive strength, microstructure

0 引言

高钛矿渣是冶炼钒钛磁铁矿时产生的一种致密矿渣<sup>[1]</sup>, 其中 TiO<sub>2</sub> 含量高, 常以钙钛矿、钛辉石形式存在于高钛矿渣中。高钛矿渣的化学结构稳定, 活性较低, 物理力学性能好, 将其作为混凝土的骨料使用具有较大优势<sup>[2-4]</sup>。但目前研究表明, 高钛矿渣集料表面粗糙多孔, 吸水率大, 掺入钛矿渣骨料的混凝土会出现拌合物浆体量低、工作性变差、泵送施工困难等问题, 使其应用量受限<sup>[5-6]</sup>。为此, 如何提升高钛矿渣骨料在混凝土中的利用率, 对固废资源化处置及建材行业的可持续发展至关重要。

现有研究发现将混凝土用水通过物理激发<sup>[7-8]</sup>, 破坏水分子缔合结构, 提高水的化学活性, 可有效提升混凝土的工作性、力学性能及耐久性<sup>[9-11]</sup>。丛瑗等<sup>[12]</sup>的研究表明, 当水以一定的流速经过相应的磁场产生的磁化水可显著提高水泥浆体的流动性; GHOLHAKI 等<sup>[13]</sup>研究表明磁化水可改善自密实混凝土(SCC)的流动性和粘度, 且能提高 SCC 的抗压强度和劈裂抗拉强度。这是由于磁化水的掺入, Ca(OH)<sub>2</sub> 晶体在水泥水化产物中更小, 分散性更好, C-S-H 凝胶更多, 可改善混凝土的强度和密实度, 进而提高其强度。同样的, 丁亚红<sup>[14]</sup>的研究结果表明磁化水可显著改善钢纤维再生混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度。郑彪<sup>[11]</sup>研究了磁化水对海工混凝土的力学性能及耐久性的影响, 结果表明, 磁化水海工混凝土的孔隙率相较于自来水海工混凝土小, 多害孔和有害孔更低, 导致其强度更高, 抗碳化及抗氯离子侵蚀性能优于自来水海工混凝土。ZHAO<sup>[15]</sup>

研究了变频磁化水对水泥砂浆性能的影响, 结果表明, 当交变磁场的频率高于 800 Hz 时, 磁化水的表面张力下降 20.6%, 磁化水砂浆抗压强度增加 14.8%, 并认为在合适的磁场参数下激发的磁化水制备砂浆可以减少水泥和水的用量。

综上所述, 现有研究大量讨论了静磁场或者交变磁场制备的磁化水对混凝土的作用机理, 但关于磁化水对高钛矿渣集料混凝土性能的研究较少。因此, 笔者利用磁化水优异的性质, 研究其对高钛矿渣混凝土的性能影响规律, 明晰其作用机理, 以期促进高钛矿渣综合利用, 减少碳排放, 实现建材行业高质量发展。

1 试验

1.1 原材料

普通硅酸盐水泥为四川利森建材集团有限公司什邡分公司生产的 P·O42.5R 水泥, 其具体技术指标见表 1。粉煤灰为福建某公司生产的 II 级粉煤灰, 其主要性能指标见表 2。矿粉为 S95 级矿粉, 其性能指标见表 3。细骨料为福建省南平市丰凯砂石贸易有限公司生产的石灰石质机制砂, 其堆积密度为 1 650 kg/m<sup>3</sup>, 表观密度 2 650 kg/m<sup>3</sup>, 细度模数 2.6。高钛矿渣砂为成渝钒钛科技有限公司生产的, 其化学成分见表 4, 物理性能见表 5。粗骨料为 5 ~ 25 mm 连续级配的石灰石碎石, 堆积密度 1 750 kg/m<sup>3</sup>, 表观密度 2 450 kg/m<sup>3</sup>。外加剂为江苏苏博特新材料股份有限公司生产的聚羧酸减水剂, 减水率 25%, 含固量 30%。水为自来水。

表 1 水泥的性能指标  
Table 1 Performance index of cement

| 比表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ) | 标准稠度用水量/mL | 凝结时间/min |     | 安定性 | 抗折强度/MPa |      | 抗压强度/MPa |      |
|------------------------------------------|------------|----------|-----|-----|----------|------|----------|------|
|                                          |            | 初凝       | 终凝  |     | 3 d      | 28 d | 3 d      | 28 d |
| 360                                      | 135        | 130      | 245 | 合格  | 5.0      | 8.0  | 29.5     | 48.8 |

表 2 粉煤灰的主要性能指标  
Table 2 Main performance indexes of fly ash

| 细度(45 μm)/% | 需水比/% | 28 d活性指标/% | 烧失量/% |
|-------------|-------|------------|-------|
| 23          | 94    | 70         | 4.7   |

表 3 矿粉的主要性能指标

Table 3 Main performance indexes of slag powder

| 流动度比/% | 比表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ) | 7 d活性指标/% | 28 d活性指标/% |
|--------|------------------------------------------|-----------|------------|
| 98     | 485                                      | 72        | 100        |

表 4 高钛矿渣砂化学成分  
Table 4 Chemical composition of high titanium slag aggregate

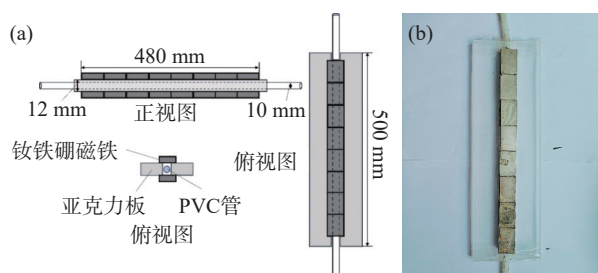
| Na <sub>2</sub> O | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | SO <sub>3</sub> | Cl   | K <sub>2</sub> O | CaO   | TiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 其他   |
|-------------------|------|--------------------------------|------------------|-----------------|------|------------------|-------|------------------|--------------------------------|------|
| 0.51              | 7.20 | 12.07                          | 22.64            | 1.58            | 0.05 | 0.27             | 29.37 | 19.76            | 5.62                           | 0.93 |

表 5 高钛矿渣砂物理性能  
Table 5 Physical property of high titanium slag sand

| 细度模数 | 堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 空隙率/% | 压碎值/% | MB值  | 渣粉含量/% | 饱和面干吸水率/% |
|------|----------------------------|----------------------------|-------|-------|------|--------|-----------|
| 2.8  | 1 800                      | 3 200                      | 45    | 7     | 0.75 | 16     | 2.5       |

## 1.2 磁场装置

采用自主研发设计的磁化水制备装置,如图 1 所示,其中钕铁硼磁铁为上海金钕磁铁股份有限公司生产的,单个磁铁大小为 60 mm × 40 mm × 10 mm,磁感应强度在 200 mT 左右,磁程长度 480 mm。水管直径为 10 mm。磁化一次,水流量分别为 40、80、120、160 mL/s。



(a) 磁化水制备装置示意; (b) 实物形貌

图 1 磁化水制备装置

Fig. 1 Magnetized water preparation device

## 1.3 配合比设计及试验方法

试验配合比如表 6 所示。研究不同水流量(40、80、120、160 mL/s)对磁化水高钛矿渣集料混凝土的性能变化,选择最优的磁化水流量(流速)。通过微观结构测试研究磁化水对混凝土的作用机理。在制备磁化水(自来水)高钛矿渣集料混凝土时,需采用磁化水(自来水)对高钛矿渣骨料预湿 30 min,然后依次将胶凝材料、粗骨料、细骨料、外加剂、预湿的高钛矿渣骨料投放于搅拌机搅拌均匀,成型;并置于 20 ℃ ± 5 ℃、相对湿度 65% ± 5% 的室内 1 d;拆模,再将混凝土试件置于标准养护室中养护至规定龄期。其中,混凝土的工作性能、含气量按照 GB/T 50080-2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》中规定的方法进行,混凝土的抗压强度根据 GB/T 50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》中规定的方法测试,试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm。

表 6 混凝土配合比  
Table 6 Concrete mix proportion kg/m<sup>3</sup>

| 水   | 水泥  | 矿粉 | Ⅱ级粉煤灰 | 机制砂 | 钛矿渣砂 | 碎石 5 ~ 25 mm | 外加剂 |
|-----|-----|----|-------|-----|------|--------------|-----|
| 175 | 210 | 35 | 105   | 431 | 431  | 1 013        | 4.5 |

将养护 28 d 龄期的试件破碎,取试件中心部位 3 ~ 6 mm 左右的样品置于含无水乙醇的超声波清

洗器中清洗 3 ~ 5 min,然后置于无水乙醇中浸泡 24 h,接着将这些样品置于 60 ℃ 的烘箱中烘 24 h,得到混凝土微观样品,最后置于玻璃干燥器中待用。采用日本日立公司生产的 TM-1000 扫描电子显微镜(SEM)对混凝土微观样品进行形貌测试分析。采用美国麦克公司生产的 Auto pore IV9500 压汞仪对混凝土微观样品进行孔结构测试分析。

样品中,JZ 代表自来水高钛矿渣集料混凝土,CH40 代表掺流量 40 mL/s 磁化水高钛矿渣集料混凝土,CH80 代表掺流量 80 mL/s 磁化水高钛矿渣集料混凝土,CH120 代表掺流量 120 mL/s 磁化水高钛矿渣集料混凝土,CH160 代表掺流量 160 mL/s 磁化水高钛矿渣集料混凝土。

## 2 结果与讨论

### 2.1 磁化水对高钛矿渣集料混凝土拌合物工作性能的影响

磁化水对混凝土拌合物工作性能的影响如表 7 所示。由表 7 可知,不同流量磁化水制备的混凝土拌合物坍落度较基准(JZ)分别增大了 9.5%、4.8%、4.8%、4.8%,扩展度较基准分别增大了 14.9%、11.0%、12.9%、3.0%。说明将自来水磁化后可以明显改善混凝土拌合物的工作性。这是由于水经过磁化后水分子间氢键断裂,导致磁化水的表面张力减小<sup>[7,16]</sup>,水分子团变小,更加容易进入胶凝材料的空隙,改善混凝土拌合物的流动性。

表 7 磁化水对高钛矿渣集料混凝土工作性能的影响  
Table 7 Influence of magnetized water on the workability of high titanium slag aggregate concrete

| 编号   | 流动度/mm |     | 放置 1 h 后流动度/mm |     |
|------|--------|-----|----------------|-----|
|      | 坍落度    | 扩展度 | 坍落度            | 扩展度 |
| JZ   | 210    | 505 | 180            | 400 |
| CH40 | 230    | 580 | 220            | 500 |
| CH80 | 220    | 560 | 205            | 480 |

随着磁化水流量的增大,混凝土拌合物工作性逐渐降低,当磁化水流量为 160 mL/s 时制备的混凝土拌合物,其坍落度和扩展度相较于水流量为 40 mL/s 制备的混凝土拌合物分别减小 4.4%、13.5%,其工作性和自来水混凝土拌合物接近。这主要是由

于水通过磁场时,水分子间氢键断裂与结合是一个动态的过程,当水流量增大,自来水通过磁场的速度增大,水分子间的氢键来不及断裂,水仍以水分子团簇形式存在,或者水分子团簇被磁场破坏较少,水的性质改变较小<sup>[7-8]</sup>。导致混凝土拌合物性能与自来水制备的混凝土拌合物相差不大。

将混凝土拌合物放置 1 h 后,测试混凝土的工作性,如表 7 所示,磁化水制备的混凝土拌合物 1 h 后的坍落度、扩展度损失相较于自来水制备的混凝土拌合物小,说明磁化水能改善混凝土拌合物的坍落度损失,扩展度损失。

2.2 磁化水对高钛矿渣集料混凝土拌合物含气量的影响

磁化水对高钛矿渣集料混凝土拌合物含气量的影响如表 8 所示。由表 8 可知,将自来水经过磁场磁化后再制备混凝土会增加混凝土拌合物的含气量,当磁化水的流量为 40 mL/s 时,磁化水高钛矿渣集料混凝土拌合物的含气量较自来水高钛矿渣集料混凝土拌合物的含气量增加 33.3%,这是由于自来水磁化后水的表面张力减小,混凝土在拌合过程中可能会引入气量增加。混凝土工作性的改善可能还与含气量增加有关。随着磁化水流量的增加,含气量逐渐降低,这是由于磁化水流量增大,流速变快,磁场对水的改性作用变弱。

表 8 高钛矿渣集料混凝土拌合物含气量  
Table 8 Air content in high titanium slag aggregate concrete mixtures

| 编号    | 含气量/% |
|-------|-------|
| JZ    | 2.4   |
| CH40  | 3.2   |
| CH80  | 3.1   |
| CH120 | 2.9   |
| CH160 | 2.5   |

2.3 磁化水对高钛矿渣集料混凝土抗压性能的影响

磁化水对高钛矿渣集料混凝土抗压强度的影响如图 2 所示,不同养护龄期下磁化水对高钛矿渣集料混凝土强度的影响有明显差异。当养护龄期为 7 d 时,磁化水对高钛矿渣集料混凝土强度提升作用不明显,这跟混凝土的水化程度和孔隙率有关。当养护龄期为 28 d 时,磁化水对高钛矿渣集料混凝土抗压强度的提升效果显著,当磁化水流量分别为 40、80、120、160 mL/s 时,其制备的高钛矿渣集料混凝土

28 d 抗压强度相对自来水混凝土分别提升了 8.9%、6.7%、5.8%、2.3%。同样的,养护龄期为 60 d 时,混凝土的强度变化规律与 28 d 相似,其制备的高钛矿渣集料混凝土 60 d 抗压强度相对自来水混凝土分别提升了 11.6%、7.6%、5.9%、2.3%。这可能是由于磁场作用改变了水分子团簇,形成更多的小水分子团,进而在水泥水化过程中,磁化水更容易穿透水泥水化产生的水化产物层,能够更好地参与水化反应,改善混凝土的强度<sup>[17]</sup>。

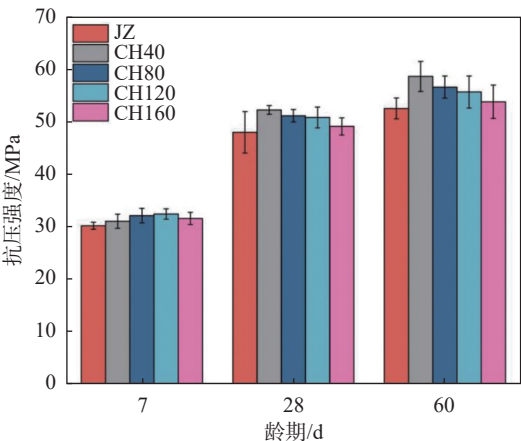


图 2 磁化水对高钛矿渣集料混凝土抗压强度的影响  
Fig. 2 The impact of magnetized water on the compressive strength of high titanium slag aggregate concrete

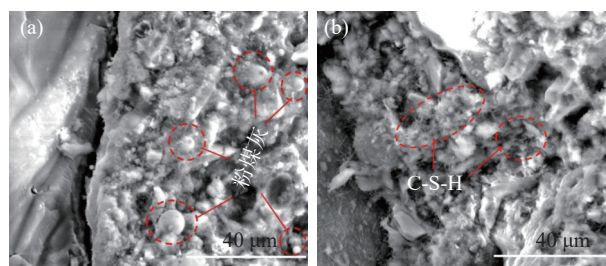
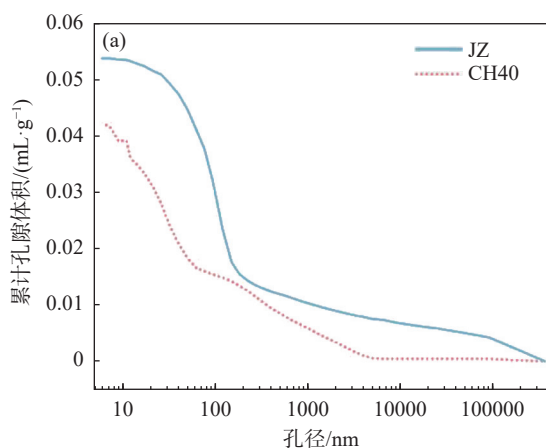
随着磁化水流量的增大,高钛矿渣集料混凝土 28、60 d 抗压强度逐渐降低,这是由于磁化水流量增大,磁场对水的改性作用变弱,磁化水对高钛矿渣集料混凝土强度的提升作用逐渐变弱。因此,对于这种磁场强度条件下,磁化水的最佳流速为 40 mL/s。

2.4 SEM 图像分析

磁化水对高钛矿渣集料混凝土 28 d 龄期微观结构影响如图 3 所示,与磁化水制备的高钛矿渣集料混凝土(CH40)相比,自来水制备的高钛矿渣集料混凝土(JZ)水泥基体与骨料之间有较大裂纹,且水泥基体有较多的未反应矿物掺合料(粉煤灰),水化产物相对较少,水化反应程度相对较低。而 CH40 中有大量的 C-S-H 水化产物,表明水化反应程度较高,且骨料与水泥基体之间较为密实,水泥基体与骨料界面之间的粘结力和咬合力增强,水泥基体与骨料间的界面强度得到提升,在宏观上表现为 28 d 强度较高。这说明自来水经磁场作用后能提高混凝土中矿物掺合料的火山灰反应,使混凝土中的水化反应程度更高,骨料与水泥基体间更为密实,高钛矿渣骨料与水泥基体间的“销栓效应”进一步增强<sup>[1]</sup>。

## 2.5 压汞分析

磁化水对高钛矿渣集料混凝土 28 d 龄期孔结构的影响如表 9 和图 4 所示,磁化水制备的高钛矿渣集料混凝土(CH40)的孔隙率为 8.42%,而自来水制备的高钛矿渣集料混凝土(JZ)的孔隙率为 12.01%,28 d 龄期的孔隙率降低 3.59%。磁化水可显著降低高钛矿渣集料混凝土硬化后的孔隙率。此外,根据吴中伟先生对孔结构提出的无害孔(<20 nm)、少害孔(20~100 nm)、有害孔(100~200 nm)、多害孔(>200 nm)四种类别可知,自来水制备的高钛矿渣集料混凝土无害孔和多害孔比例分别为 36.65%、23%(表 9),而磁化水制备的高钛矿渣集料混凝土无害孔和多害孔比例分别为 46.49%、16.45%,说明磁化水可显著降低高钛矿渣集料混凝土中多害孔的比例,大幅度提高了无害孔比例。这是由于磁化水会提高混凝土水化反应程度,优化了混凝土中的孔结构,使得混凝土内部更加密实,进一步增强了高钛矿渣集料混凝土的强度。



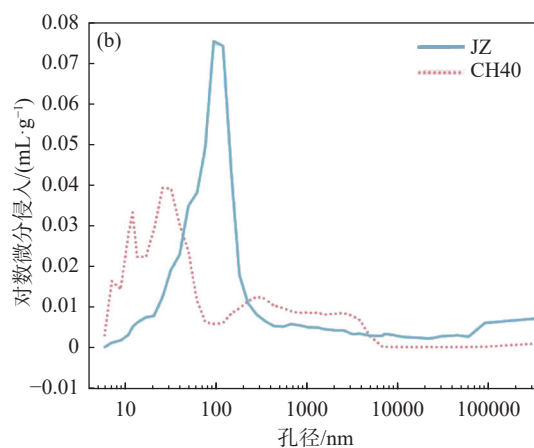
(a) JZ; (b) CH40

图 3 高钛矿渣集料混凝土 28 d 龄期的 SEM 图像

Fig. 3 The SEM images of high titanium slag aggregate concrete at a 28-day age

表 9 高钛矿渣集料混凝土 28 d 龄期的孔隙率与孔径分布  
Table 9 Porosity and pore size distribution of high titanium slag aggregate concrete at a 28-day age %

| 编号   | 孔隙率   | 孔径分布   |              |               |         |
|------|-------|--------|--------------|---------------|---------|
|      |       | <20 nm | 20 ~ <100 nm | 100 ~ <200 nm | >200 nm |
| JZ   | 12.01 | 36.65  | 34.80        | 5.55          | 23.00   |
| CH40 | 8.42  | 46.49  | 29.67        | 7.39          | 16.45   |



(a) 累计孔径分布; (b) 孔径分布

图 4 高钛矿渣集料混凝土 28 d 龄期的累计孔径分布曲线与孔径分布曲线

Fig. 4 Cumulative pore size distribution curve and pore size distribution curve of high titanium slag aggregate concrete at a 28-day age

## 3 结论

1)磁化水会改善高钛矿渣集料混凝土拌合物的工作性,随着水流量的增大,改善效果逐渐变差。当水流量为 40 mL/s 时,其坍落度较自来水高钛矿渣集料混凝土拌合物提升 9.5%,扩展度提升 14.9%。

2)磁化水会增加高钛矿渣集料混凝土拌合物的含气量,随着水流量的增大,混凝土拌合物含气量逐渐降低,这与自来水经磁化后水的性质改变有关。

3)磁化水对高钛矿渣集料混凝土不同龄期的抗压强度影响有明显差异,磁化水对高钛矿渣集料混

凝土早期强度提升不明显,但对 28、60 d 龄期的抗压强度提升显著。尤其当水流量为 40 mL/s 时,其 28、60 d 抗压强度相对自来水高钛矿渣集料混凝土分别提升了 8.9%、11.6%。

4)扫描电子显微镜和压汞测试结果表明,磁化水高钛矿渣集料混凝土骨料与水泥基体裂纹较小,水化产物较多,未水化的水泥及矿物掺合料较少,反应程度更高,高钛矿渣骨料与水泥基体间的“销栓效应”进一步增强;且无害孔比例较高,有害孔比例较少,孔隙率较自来水制备的高钛矿渣集料混凝土低 3.59%,结构更加致密。

## 参考文献

- [1] YANG Z, LI B X, ZHANG Z B, *et al.* Research progress on application of high titanium slag in cement and concrete[J]. Materials Reports, 1-18.  
(杨尊, 李碧雄, 张治博, 等. 高钛矿渣用于水泥混凝土的研究应用进展[J]. 材料导报, 1-18.)
- [2] LI X Y. Study on properties and paste-aggregate interaction mechanism of high performance concrete with high titanium slag as aggregate[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.  
(李晓英. 高钛矿渣高性能混凝土性能及其浆-骨界面作用机制研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.)
- [3] LI J, YU Z, XU F, *et al.* The evolution mechanism of anti-abrasive UHPC microstructure under impact and erosion[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134282.
- [4] WANG W, LI X, SHEN J, *et al.* Feasibility of high titanium heavy slag used as aggregates for asphalt mixtures[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 411: 137332.
- [5] DING Q J, MOU T M, LIU X Q, *et al.* Preparation and application of self-compacting concrete by high titanium heavy slag[J]. Construction Technology, 2015, 44(3): 57-60, 69.  
(丁庆军, 牟廷敏, 刘小清, 等. C30 高钛重矿渣自密实混凝土研究与应用[J]. 施工技术, 2015, 44(3): 57-60, 69.)
- [6] JIANG H M, MOU T M, DING Q J. Research on the working performance of high titanium heavy slag concrete[J]. Concrete, 2011(5): 125-127.  
(江海民, 牟廷敏, 丁庆军. 高钛重矿渣混凝土的工作性能研究[J]. 混凝土, 2011(5): 125-127.)
- [7] RONG X, LI J J, DAN H B, *et al.* Characteristics, mechanism and applications of magnetized water: a review[J]. Materials Reports, 2022, 36(9): 65-71.  
(戎鑫, 李建军, 但宏兵, 等. 磁化水的特性、机理及应用研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(9): 65-71.)
- [8] LI Y G, YI S G, ZHANG L B, *et al.* Recent and prospective research on magnetized water-based concrete[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2019, 37(2): 331-338.  
(李月光, 伊书国, 张霖波, 等. 磁化水水泥混凝土研究现状与发展前景[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(2): 331-338.)
- [9] KESHTAA M M, ELSHIKH M M Y, KALOOP M R, *et al.* Effect of magnetized water on characteristics of sustainable concrete using volcanic ash[J]. Construction and Building Materials, 2022, 361: 129640.
- [10] AHMED S M, MANAR D F. Effect of static magnetic field treatment on fresh concrete and water reduction potential[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 14: e00535.
- [11] ZHENG B, LI S K, LI Y L, *et al.* Effect of magnetized water on mechanical properties and durability of marine concrete[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2024, 43(6): 2039-2046.  
(郑彪, 李顺凯, 李育林, 等. 磁化水对海工混凝土力学性能和耐久性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(6): 2039-2046.)
- [12] CONG Y, ZHANG P, WU J W, *et al.* Effect of magnetic field activated water on properties of cement mixture[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2017, 36(12): 4217-4223.  
(丛瑗, 张鹏, 吴建伟, 等. 磁场活化水对水泥拌合物性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(12): 4217-4223.)
- [13] GHOLHAKI M, HAJFOROUSH M, KAZEMI M. An investigation on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating magnetic water with various pozzolanic materials[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 173-180.
- [14] DING Y H, CHEN B, WU J, *et al.* Early strength study on recycled aggregate concrete of magnetized water steel fiber[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2021, 40(4): 1178-1185+1204.  
(丁亚红, 陈冰, 武军, 等. 磁化水钢纤维再生混凝土早期强度研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(4): 1178-1185+1204.)
- [15] ZHAO G, ZHANG Z, MA N, *et al.* Preparation and characterization of cement mortar mixed with alternating field-magnetized water[J]. Construction and Building Materials, 2024, 416: 135204.
- [16] MOHAMMADNEZHAD A, AZIZI S, FARAHANI H S, *et al.* Understanding the magnetizing process of water and its effects on cementitious materials: A critical review[J]. Construction and Building Materials, 2022, 356: 129076.
- [17] NARMATHA M, ARULRAJ P, BARI J A. Effect of magnetic water treatment for mixing and curing on structural concrete[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 37: 671-676.