

# 不同龄期下偏高岭土和煤矸石改性水泥砂浆性能研究\*

李龙吉

(中铁建城建交通发展有限公司, 江苏 苏州 215000)

**摘要:** 在当前“双碳”背景下, 对水泥砂浆中偏高岭土和煤矸石等替代材料的改性研究, 可有效降低传统水泥砂浆的碳排放量, 减少对环境的不良影响。通过偏高岭土、煤矸石取代 5%, 10%, 15%, 20%, 30% 的水泥制备胶砂试件, 研究试件在不同掺量下随龄期对抗压强度、火山灰活性指数、抗拉强度、硫酸钠侵蚀后强度及电阻率的影响。结果如下: 偏高岭土掺量为 20% 时抗压强度提高最大, 煤矸石掺量为 30% 时抗压强度降低最大, 试件的抗压强度随龄期增加而提高; 随着龄期增加, 火山灰活性指数偏高岭土、煤矸石掺量提高呈现下降趋势; 掺偏高岭土会提高试件的抗拉强度, 而掺煤矸石试件的抗拉强度则先降低后提高, 偏高岭土掺量为 15%, 煤矸石掺量为 10%, 对抗拉强度的提高最大; 试件侵蚀后强度随偏高岭土掺量增加而增加, 掺煤矸石则相反, 试件侵蚀次数 1 次以内时强度较大, 而在 2~4 次侵蚀时强度较小; 掺偏高岭土和煤矸石后, 试件的电阻率随龄期的增加大致呈增大趋势, 偏高岭土掺量为 20% 时较大, 而煤矸石的掺加对电阻率影响较小。

**关键词:** 偏高岭土; 煤矸石; 水泥砂浆; 龄期; 抗压强度; 电阻率

**中图分类号:** TU528 **文献标识码:** A **文章编号:**

## The Performance of Modified Cement Mortar with Metakaolin and Coal Gangue at Different Ages

LI Longji

(China Railway Construction Urban Construction Transportation Development Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215000, China)

**Abstract:** Under carbon peaking and carbon neutrality background, the research on the modification of alternative materials such as kaolin and coal gangue in cement mortar can effectively reduce the carbon emissions of traditional cement mortar and minimize its adverse impact on the environment. Using metakaolin and coal gangue as substitutes for 5%, 10%, 15%, 20%, and 30% cement to prepare sand specimens, this paper investigates the effects of different dosages on compressive strength, volcanic ash activity index, tensile strength, strength after sodium sulfate erosion, and electrical resistivity over time. The results are as follows: When the content of metakaolin is 20%, the compressive strength increases the most, and when the content of coal gangue is 30%, the compressive strength decreases the most. The compressive strength of the specimens increases with age; As the age increases, the activity index of volcanic ash tends to decrease with the increase of metakaolin and coal gangue content; The addition of metakaolin will increase the tensile strength of the specimen, while the tensile strength of the specimen mixed with coal gangue will firstly decrease and then increase. The maximum increase in tensile strength is achieved when the content of metakaolin is 15% and the content of coal gangue is 10%; The strength of the specimen after erosion increases with the increase of metakaolin content, while the opposite is true when coal gangue is added. The strength of the specimen is higher when the erosion frequency is less than 1 time, but lower when the erosion frequency is 2~4 times; After adding metakaolin and coal gangue, the electrical resistivity of the specimens generally shows an increasing trend with age. When the content of metakaolin is 20%, it is larger, while the addition of coal gangue has a smaller impact on the electrical resistivity.

**Keywords:** metakaolin; coal gangue; cement mortar; age; compressive strength; resistivity

## 0 引言

在当前全球气候变化日益严峻的背景下, 碳达峰与碳中和的“双碳”目标已成为全球各国共同

\*江苏省建设系统科技项目 (2023ZD038)

[作者简介] 李龙吉, 高级工程师, E-mail: [LLJCR201@126.com](mailto:LLJCR201@126.com)

[收稿日期] 2024-01-12

努力的方向。建筑业作为碳排放的重要领域之一，其材料的生产和使用过程对环境造成的影响不可忽视。水泥作为建筑材料中的主要成分之一，其生产过程是碳排放的主要来源之一，对全球碳排放贡献巨大<sup>[1-3]</sup>。因此，如何在建筑材料领域实现碳减排成为当务之急。

偏高岭土富含非晶态 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，是一种具有高火山灰性质的掺合物。这些非晶态分子能有效填充砂浆的内部孔隙，并促进后续水化，从而提高强度。偏高岭土作为辅助添加剂，可提高橡胶砂和混凝土的流变性、力学性能和耐久性。根据研究<sup>[4-5]</sup>，偏高岭土可作为一种添加剂来制造满足环境、性能和成本标准的砂或混凝土。相反，煤矸石是指煤炭开采、分类和清洗后释放出来的垃圾。在我国，每年释放3.3亿t煤矸石。已有研究表明，采用煤矸石代替石材作为粗集料的改性混凝土试件强度会下降。用磨碎的细煤矸石代替砂石作为细集料制成的改性混凝土试件强度会提高，且煤矸石替代量对改性试件强度也有影响<sup>[6-7]</sup>。

对水泥砂浆中偏高岭土和煤矸石等替代材料的改性研究表明，其可有效降低传统水泥砂浆的碳排放量，减少对环境的不良影响。对不同龄期下偏高岭土和煤矸石改性水泥砂浆性能进行研究，正是对“双碳”目标的积极响应和践行。这项研究具有重要的理论和实践意义，对推动建筑材料行业向更加环保、低碳的方向发展具有积极的促进作用。

而目前国内对偏高岭土、煤矸石代替部分水泥制备改性水泥砂浆的研究不多，本文通过对不同龄期下偏高岭土和煤矸石改性水泥砂浆性能进行研究为工程应用提供理论依据。

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料

本研究制备水泥胶砂试样的主要材料有：南京豫南洋建材公司提供的42.5级普通硅酸盐水泥，细度模数为2.82的中砂，河北灵寿县嘉硕建材公司提供的偏高岭土，河北岩创矿产品有限公司提供的煤矸石粉（经700℃煅烧，细磨至200目），聚羧酸减水剂。偏高岭土20%粒径在0.1~1 μm，80%粒径在1~10 μm，99%粒径在0.4~100 μm。

### 1.2 试验设计

为研究不同龄期下偏高岭土和煤矸石对改性水泥砂浆性能的影响程度，本文详细介绍采用偏高

岭土和煤矸石代替5%，10%，15%，20%，30%的水泥制备改性水泥砂浆的试验方法。研究试样的制备步骤如下：首先，将一定量的胶凝材料(水泥、偏高岭土、煤矸石粉)与中砂干拌2min；然后，加入减水剂和水再慢速搅拌2min；最后，快速搅拌1min，即可完成试件的制作，浇筑1d后取出模具，然后放入标准养护箱养护<sup>[8]</sup>。

本研究制备了48组共计576块40mm×40mm×160mm长方体试件，待试件养护至第14天、28天、45天、90天、180天对其进行抗压强度、火山灰活性指数、抗拉强度、侵蚀性能、黏附性能、电阻率测量记录。

当水/水泥质量比( $W/C$ )未达到110%±5%的流动性时，需添加流化添加剂。流化添加剂为粉末形式，可提高混凝土或砂浆的流动性，可增加5%~10%混凝土或者砂浆拌合物的坍落度，或减少约10%的用水量。技术资料注明用量如下：1袋50kg水泥需200g流化产品。

表1 流化添加剂用量

Table 1 Dosage of fluidization additive

| 材料   | 代换/% | 流化添加剂/(g·kg <sup>-1</sup> ) |
|------|------|-----------------------------|
| 偏高岭土 | 5    | 0                           |
| 偏高岭土 | 10   | 0                           |
| 偏高岭土 | 15   | 0                           |
| 偏高岭土 | 20   | 3                           |
| 偏高岭土 | 30   | 6                           |
| 煤矸石  | 5    | 0                           |
| 煤矸石  | 10   | 0                           |
| 煤矸石  | 15   | 0                           |
| 煤矸石  | 20   | 6                           |
| 煤矸石  | 30   | 6                           |

除了获得每种替代材料的凝固时间和正常一致性外，还确定了每种材料的替代百分比从而显示出更好的力学性能。水硬水泥正常稠度的标准测试方法是按水灰比设定，如表1所示，这是控制混合物符合要求所必需的，这些比例的混合物作为制备所有测试样品的的基础，用于5个龄期，即14，28，45，90，180d。

## 2 性能指标

### 2.1 力学性能

抗压强度是砂浆材料力学性能的一个关键指标，浆液注入土层或岩层后，由液相凝固成结石体。根据GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法（ISO法）》<sup>[9-10]</sup>，采用40mm×40mm×160mm小梁试样进行抗压强度室内试验，而抗拉强度试验试样则为煤球（花生形试样），确定砂浆

的直接拉伸强度。

## 2.2 火山灰活性指数

利用砂浆的抗压强度数据还可确定替代材料是否显示出与水泥反应产物反应的任何迹象，这通过计算电阻活性指数 (RAI) 或 PAI 来实现，本研究中使用的方法是物理分析法，将控制砂浆的抗压强度与用替代材料制成的砂浆阻力联系起来。

## 2.3 侵蚀后强度

为了分析耐硫酸盐侵蚀性，制作每边 5cm 立方体试样，这些试样的制作方法与抗压缩性试验用立方体相同，该试验的每个替代百分比制作 18 个立方体。试样在 90d 时经受硫酸钠腐蚀，腐蚀试验程序符合标准<sup>[11]</sup>。对于该加速侵蚀试验，对每种砂浆混合物进行 4 个循环，在每个循环结束时记录样品的质量损失，且在每个循环结束时在轴向压缩阻力下测试 3 个样品。

## 2.4 电阻率

混凝土或砂浆的电阻率 (ER) 与水泥基体的微观结构、孔隙结构、孔隙率和孔径分布有关。它也是离子浓度及其在孔隙溶液中迁移率的函数<sup>[12]</sup>。

水泥基体的微观结构和孔隙溶液的化学性质受到水泥的化学成分、水泥用量、水灰比及添加剂和辅助胶凝材料使用的影响。使用电阻计设备测量水泥基材料的电阻率时，上述因素会直接影响电阻率的测量结果。

# 3 试验结果

## 3.1 抗压强度

分别用偏高岭土和煤矸石代替 5%，10%，15%，20%，30% 的水泥制备改性水泥砂浆，研究不同试件抗压强度随龄期的变化，如图 1 所示。

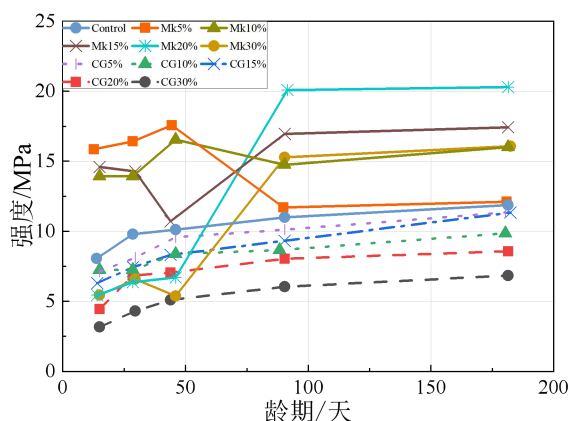


图 1 偏高岭土和煤矸石替换后的抗压强度

Fig.1 Compressive strength after replacement of metakaolin and coal gangue

由图 1 可知，偏高岭土的添加会普遍提高试件抗压强度，而添加煤矸石则会普遍降低试件抗压强度。不同偏高岭土掺量下，其龄期-抗压强度曲线变化趋势不一，其中偏高岭土掺量为 5%，10%，30% 时，其抗压强度随龄期呈先上升再下降又上升趋势最后趋于稳定，而偏高岭土掺量为 15% 时，抗压强度则随龄期呈先下降再上升最后趋于稳定，偏高岭土掺量为 20% 时，抗压强度则随龄期呈上升的幅度先小后大最后趋于稳定，试件在 180d 趋于稳定后，与不加偏高岭土相比，偏高岭土掺量为 5%，10%，15%，20%，30% 时，抗压强度分别提高 20.53%，34.99%，46.88%，71.16%，35.58%。不同掺量的煤矸石试件的抗压强度随着龄期的增加而提高，提高幅度先大后小，与不加煤矸石的 180d 的抗压强度相比，煤矸石掺量为 5%，10%，15%，20%，30% 时的抗压强度分别下降 4.46%，16.94%，4.45%，27.65%，42.32%。

水泥量控制直接影响混凝土强度和密实度，而偏高岭土添加则对水泥混凝土的性能产生复杂影响。当偏高岭土掺量较少时，为了维持混凝土的正常水化反应，需增加水泥用量。这样有助于创造出对混凝土强度增长有益的碱性环境，从而提升混凝土的整体性能。偏高岭土因其含有火山灰特性，参与了混凝土中大量水化过程，增加了混凝土中的水化产物，进而提高了试件强度<sup>[13]</sup>。

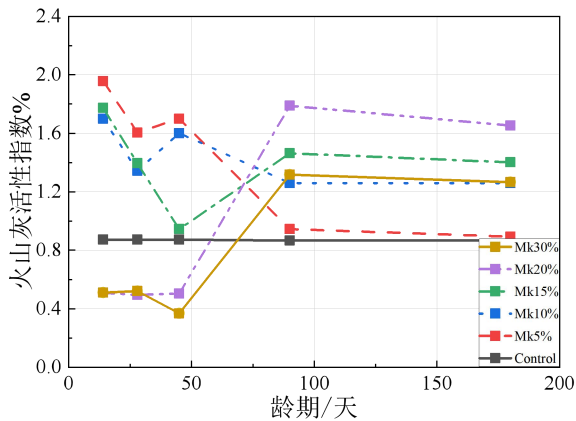
在确定最佳掺量比例时，需考虑火山灰效应和微集料填充效应。研究结果显示，当偏高岭土取代水泥量的 20% 时，试件展现出最佳的火山灰效应和微集料填充效应，因此达到了最高强度。然而当偏高岭土掺量过高时，情况就会发生变化。过多的偏高岭土会导致水泥用量减少，从而降低了混凝土试件的密实度。密实度的下降直接影响了混凝土的强度表现，导致试件整体强度降低。此外，过多的偏高岭土会导致碱性环境不足，无法为其中的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  提供良好的碱性环境，进一步降低了试件强度。

在煤矸石掺入试件后，研究发现其会导致水化速度和水化程度降低。这意味着混凝土中的水化反应进行得更更为缓慢，导致试件整体强度下降。然而当煤矸石掺量达到一定比例（如 15%）时，试

件强度却出现回升趋势。回升是因为适量煤矸石能充分发挥火山灰效应和微集料效应。

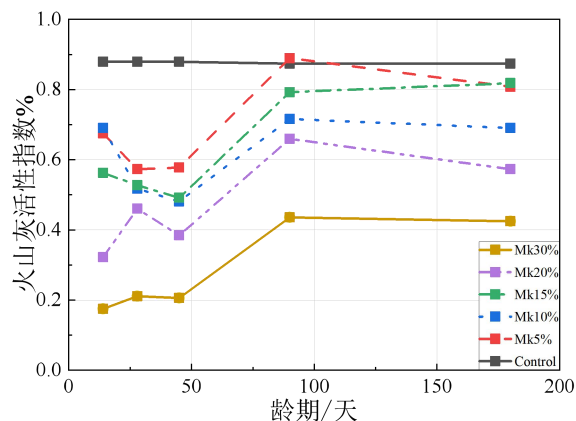
### 3.2 火山灰活性指数

分别用偏高岭土和煤矸石代替 5%，10%，15%，20%，30%水泥制备改性水泥砂浆，研究不同试件抗压强度随龄期变化，如图 2 所示。



a 偏高岭土

由图 2a 可知，随着龄期增加，不同偏高岭土掺量下火山灰活性指数呈现不同趋势，当偏高岭土掺量为 5%，10%时，火山灰活性指数随着龄期先下降再上升；而当偏高岭土掺量为 15%，30%时，火山灰活性指数随龄期呈下降趋势，且偏高岭土掺量为 15%时下降趋势比 30%陡峭；偏高岭土掺量为 20%时，龄期对火山灰活性指数影响较弱。偏高岭土掺量 5%，10%，15%的火山灰活性指数都比不加偏高岭土时高，在 0.8 以上；而偏高岭土掺量 20%，30%时，火山灰活性指数则比不加偏高岭土时低，都在 0.7 以下。



b 煤矸石

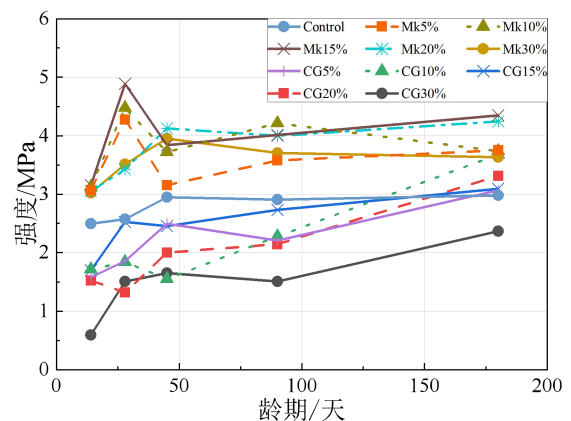
图 2 偏高岭土与煤矸石替换后火山灰活性指数

Fig.2 Pozzolanic activity index after replacement of metakaolin and coal gangue

由图 2b 可知，随着龄期增加，不同煤矸石掺量下火山灰活性指数都比不掺煤矸石的火山灰活性指数低，当煤矸石掺量为 5%，10%，15%时，火山灰活性指数随龄期呈现不断下降趋势；而当煤矸石掺量为 20%，30%时，火山灰活性指数随龄期呈先上升再下降趋势，且偏高岭土掺量为 20%时下降趋势较明显。火山灰活性指数随煤矸石掺量的提高而降低，但都在 0.7 以下。导致上述变化规律的原因可能是煤矸石作为一种微填充材料减少了材料孔隙率，而火山灰活性指数与试件的孔隙率有着正相关关系，为此当煤矸石掺量增加时其孔隙率降低，导致其火山灰活性指数降低。

### 3.3 抗拉强度

分别用偏高岭土和煤矸石代替 5%，10%，15%，20%，30%的水泥制备砂浆，研究不同试件抗拉强度随龄期变化，如图 3a 所示。



a 抗拉强度

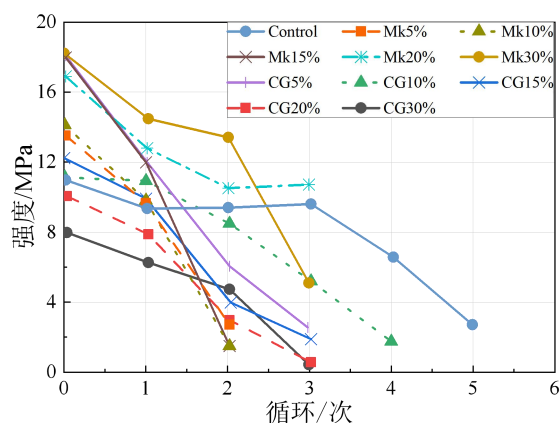
由图 3a 可知，添加偏高岭土会普遍提高试件的抗拉强度，而添加煤矸石试件的抗拉强度则会在前期先降低后又大部分提高。不同偏高岭土掺量下，其龄期-抗拉强度曲线变化趋势不一，其中偏高岭土掺量为 5%，10%，15%，20%时，其抗拉强度随龄期呈先上升再下降又上升趋势，最后趋于稳定；而偏高岭土掺量为 30%时，抗拉强度则是随龄期先上升再下降最后趋于稳定。试件在 180d 趋于稳定后，与不加偏高岭土相比，偏高岭土掺量为 5%，10%，15%，20%，30%时，抗拉强度分别提高 25.92%，25.58%，46.12%，42.76%，22.22%。不同掺量的煤矸石试件的抗拉强度随龄期增加而提高，其中偏高岭土掺量为 5%，10%，15%，30%时，其抗拉强度随龄期呈先上升再下降又上升趋势，最后趋于稳定；而偏高岭土掺量为

30%时, 抗拉强度则是随龄期先下降再上升最后趋于稳定。与不加煤矸石的 180d 抗拉强度相比, 煤矸石掺量为 5%, 10%, 15%, 20%, 30%时的抗拉强度分别提高 3.03%, 23.56%, 4.04%, 11.44%, -20.53%。

在试件早期龄期阶段, 火山灰效应对  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的影响相对较小。尽管这种效应在试件初始阶段并不显著, 但随着时间推移, 它逐渐开始发挥作用。随着水泥胶砂试件龄期增长, 逐渐进行水化反应, 大量  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  生成并释放到试件中。这种碱性物质的释放导致试件内部环境的碱性化。在这种碱性环境下,  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的火山灰效应得以充分发挥, 形成硬度更高化合物, 从而增强试件整体强度。

### 3.4 抗侵蚀性

分别用偏高岭土和煤矸石代替 5%, 10%, 15%, 20%, 30%的水泥制备改性水泥砂浆, 研究不同试件在硫酸钠侵蚀后强度变化, 如图 3b 所示。



b 侵蚀后强度

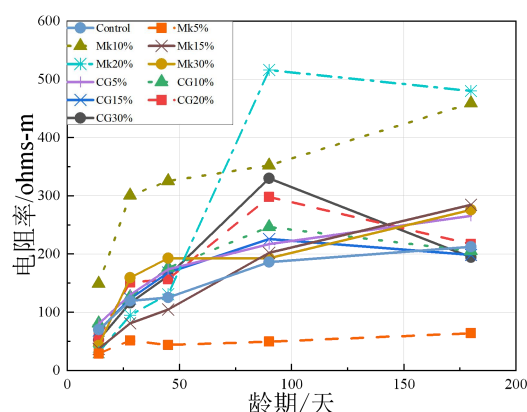
由图 3b 可知, 当侵蚀次数相同时, 试件侵蚀后强度随偏高岭土掺量增加而增加, 随煤矸石掺量增加而降低, 且和不掺偏高岭土与煤矸石侵蚀后强度相比, 试件大多在 0~1 次侵蚀后强度较大, 而在 2~4 次侵蚀后强度较小。

添加偏高岭土对试件的耐硫酸钠侵蚀性起作用主要是因为偏高岭土的引入触发了微集料填充效应, 从而提高了试件内部密实度。同时, 在试件受到硫酸钠侵蚀时, 产生的侵蚀产物也填充了试件内部孔隙, 进一步增强了其耐侵蚀性能。相反地, 掺入煤矸石则对试件的耐硫酸钠侵蚀性能产生负面影响。这是因为煤矸石中含量较低的  $\text{C}_3\text{S}$  和  $\text{C}_3\text{A}$  导

致水泥的水化程度下降, 形成的水化产物间孔隙增多, 从而降低了试件的密实度和抗硫酸钠侵蚀能力。随着硫酸钠侵蚀次数增加, 试件的抗压强度明显下降。这是由于侵蚀产物吸水后体积膨胀, 导致试件内部裂缝增多, 硫酸钠溶液侵蚀加剧, 并导致 C-S-H 凝胶被侵蚀, 从而削弱了试件的整体结构稳定性。

### 3.5 电阻率

分别用偏高岭土和煤矸石代替 5%, 10%, 15%, 20%, 30%的水泥制备改性水泥砂浆, 研究不同试件电阻率随龄期变化, 如图 3c 所示。



c 电阻率

图 3 偏高岭土和煤矸石替换后的抗拉强度、侵蚀后强度与电阻率

Fig.3 Tensile strength, post-erosion strength and resistivity after replacement of metakaolin and coal gangue

由图 3c 可看出, 掺偏高岭土和煤矸石后, 试件的电阻率随龄期增加大致呈增大趋势, 除了偏高岭土掺量为 5%时电阻率会降低以外, 其他所有情况 (包括偏高岭土和煤矸石的添加) 都会使得试件的电阻率变大。并且电阻率随偏高岭土掺量变化呈上下起伏式变化, 当偏高岭土掺量为 20%时电阻率较大, 而煤矸石的掺量与对照组相比变化较小, 与 180d 养护后的电阻率相比, 几乎无明显变化。

采用偏高岭土取代水泥时, 由于偏高岭土含量相对较低, 而水泥含量相对较高, 这种情况下偏高岭土能充分参与水泥的水化反应。此外, 由于微集料填充效应的存在, 试件内部结构变得更加致密。此种结构调整导致试件内部孔隙减少及导电离子通路减少。因此, 试件的电阻率会随之增加。而当煤矸石取代水泥时, 由于煤矸石中  $\text{C}_3\text{S}$  和  $\text{C}_3\text{A}$

的含量较低,导致改性试件中水泥含量下降,水灰比也会降低。在水泥水化过程中产生的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  也会随之减少。这种情况导致试件中水化程度降低。与此同时,水化过程中产生的水化产物间孔隙相对增多,导致导电离子通路增加。因此,试件的电阻率会随之减小。

## 4 结语

1)添加偏高岭土会普遍提高试件的抗压强度,而添加煤矸石则会普遍降低试件的抗压强度。与不加偏高岭土相比,偏高岭土掺量为 20%时,抗压强度提高最大,达到 71.16%;不同掺量的煤矸石试件的抗压强度随龄期增加而提高,提高幅度先大后小。

2)随着龄期增加,不同偏高岭土掺量下火山灰活性指数呈大致下降趋势。偏高岭土掺量 5%~15%的火山灰活性指数比对照组高,在 0.8 以上;而偏高岭土掺量在 20%,30%时,火山灰活性指数则比对照组低,在 0.7 以下。火山灰活性指数随着煤矸石掺量提高而降低,但都在 0.7 以下。

3)添加偏高岭土会普遍提高试件抗拉强度,而添加煤矸石试件的抗拉强度则会在前期先降低后又大部分提高。试件在 180d 趋于稳定后,偏高岭土掺量为 15%,煤矸石掺量为 10%,对抗拉强度的提高最大,分别达到 46.12%,23.56%。

4)当侵蚀次数相同时,试件侵蚀后强度随偏高岭土掺量增加而增加,随煤矸石掺量增加而降低,并且和不掺偏高岭土与煤矸石侵蚀后强度相比,试件大多在 0~1 次侵蚀后强度较大,而在 2~4 次侵蚀后强度较小。

5)掺偏高岭土和煤矸石后,试件的电阻率随龄期增加大致呈增大趋势,当偏高岭土掺量为 20%时电阻率较大,而煤矸石的掺量与对照组相比变化较小,与 180d 养护后的电阻率相比,几乎无明显变化。

### 参考文献:

- [1] HABERT G, MILLER S A, JOHN V M, et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries[J]. Nature reviews earth & environment, 2020, 1(11): 559-573.
- [2] IEA,WBCSD. Technology roadmap: low-carbon transition

in the cement industry[Z]. 2018.

- [3] FAVIER A, DE WOLF C, SCRIVENER K, et al. A sustainable future for the European cement and concrete industry: technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050[R]. ETH Zurich, 2018.
- [4] 曾俊杰,王胜年,熊建波,等. 偏高岭土对低热硅酸盐水泥水化性能的影响 [J]. 混凝土, 2020, (05): 69-72.
- ZENG J J, WANG S N, XIONG J B, et al. Influence of metakaolin on hydration performance of low heat Portland cement[J]. Concrete, 2020(5): 69-72.
- [5] 莫宗云,马腾飞,王大光. 偏高岭土活性研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(1): 110-115, 133.
- MO Z Y, MA T F, WANG D G. Research progress on activity of metakaolin [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2017, 36(1): 110-115, 133.
- [6] 王爱国,朱愿愿,徐海燕,等. 混凝土用煤矸石骨料的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2076-2086.
- WANG A G, ZHU Y Y, XU H Y, et al. Research progress on coal gangue aggregate for concrete[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2019, 38(7): 2076-2086.
- [7] 马宏强,易成,朱红光,等. 煤矸石集料混凝土抗压强度及耐久性能[J]. 材料导报, 2018, 32(14): 2390-2395.
- MA H Q, YI C, ZHU H G, et al. Compressive strength and durability of coal gangue aggregate concrete [J]. Materials Review, 2018, 32 (14): 2390-2395.
- [8] 田学春. 大掺量非等级粉煤灰和煤矸石干混砂浆的研制[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- TIAN X C. Development of dry mix mortar with high content non grade fly ash and coal gangue [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [9] 中国建筑材料科学研究总院有限公司, 厦门艾思欧标准砂有限公司, 安徽海螺水泥股份有限公司. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- China Building Materials Academy Co., Ltd., Xiamen Aisio Standard Sand Co., Ltd., Anhui Conch Cement Co., Ltd. Test method of cement mortar strength(ISO method): GB/T 17671—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [10] 汪宏伟,徐辉东,马芹永. 粉煤灰-偏高岭土水泥基复合材料性能研究[J]. 中国科技论文, 2019, 14(4): 452-457.
- WANG H W, XU H D, MA Q Y. Performance of cement-based composite materials with fly ash and metakaolin [J]. China sciencepaper, 2019, 14(4): 452-457.

- [11] HAYNES H. ASTM C 88 test on soundness of aggregate

---

using sodium sulfate or magnesium sulfate: a study of the mechanisms of damage[J]. Journal of ASTM international, 2005, 2(1): JAI12517.

[12] 黄吕霖. 四电极法复合材料无损检测技术优化研究[D].天津: 中国民航大学,2020.

HUANG L L.Optimization of non destructive testing technology for four electrode composite materials[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.

[13] 刘谦,郭玉森,仲涛,等.高火山灰活性煅烧煤矸石添加量对水泥抗压强度的影响[J].硅酸盐通报,2021,40(3):936-942.

LIU Q, GUO Y S, ZHONG T, et al. Effect of adding amount of calcined coal gangue with high pozzolanic reactivity on cement compressive strength[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2021, 40(3): 936-942.