

# 粉煤灰基人造骨料制备及应用研究

曾小星<sup>1,2</sup>, 余其俊<sup>1</sup>, 韦江雄<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510640; 2. 澳门水泥厂有限公司, 澳门 999078)

**摘要:** 为进一步高效利用粉煤灰资源, 以 75% 以上粉煤灰为主要材料, 通过水泥激发及碱激发方式制备抗压强度超过 60 MPa 的粉煤灰基人造骨料, 研究粉煤灰基人造骨料与天然骨料制备的混凝土性能差异。结果表明: 与天然花岗岩及石灰石骨料相比, 在力学性能方面, 用人造骨料制备的混凝土抗压强度约为天然骨料混凝土的 75%; 在耐久性方面, 水泥激发人造骨料抗氯离子扩散性能与天然骨料较接近, 而碱激发粉煤灰骨料抗氯离子扩散性能偏差; 微观性能方面, SEM 测试显示水泥浆与天然骨料界面区粘结比较紧密, 界面过渡区宽度在 20~30  $\mu\text{m}$ , 水泥浆与人造骨料界面过渡区结构比较疏松, 宽度在 30~40  $\mu\text{m}$ 。相比于天然骨料, 粉煤灰基人造骨料混凝土界面过渡区更宽, 水化产物孔隙较多, 使用粉煤灰基人造骨料也可以制备出性能较好的混凝土。

**关键词:** 粉煤灰; 人造骨料; 碱激发; 界面过渡区; 强度; 混凝土

中图分类号: TU 528.04

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 01-0025-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.005

## Research on Preparation and Application of Fly Ash - Based Artificial Aggregate

ZENG Xiaoxing<sup>1,2</sup>, YU Qijun<sup>1</sup>, WEI Jiangxiong<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology,

Guangzhou 510640, China; 2. Macau Cement Manufacturing Co., Ltd., Macau 999078, China)

**Abstract:** To further enhance the efficient utilization of fly ash resources, fly ash - based artificial aggregates with a compressive strength exceeding 60 MPa were prepared by using fly ash (more than 75%) as the main material and through cement activation and alkali activation methods, and the differences in concrete performance between fly ash - based artificial aggregates and natural aggregates were investigated. The results show that compared to natural granite and limestone aggregates, the compressive strength of concrete prepared with artificial aggregates is approximately 75% compressive strength of concrete with natural aggregates. In terms of durability, the chloride ion diffusion resistance of cement - activated artificial aggregates is relatively close to that of natural aggregates, while alkali - activated fly ash aggregates exhibit poorer resistance to chloride ion diffusion. SEM tests reveal that the interfacial transition zone between cement paste with natural aggregates is densely bonded, with a width of 20~30  $\mu\text{m}$ . In contrast, the interfacial transition zone of artificial aggregates is looser in structure, with a width of 30~40  $\mu\text{m}$ . Compared with natural aggregates, fly ash - based artificial aggregate concrete has a wider interfacial transition zone and more pores in its hydration products, but it is possible to prepare high - performance concrete using fly ash - based artificial aggregates.

**Key words:** fly ash; artificial aggregate; alkali activation; interface transition zone; strength; concrete

## 材料科学

## 0 引言

全球每年产生粉煤灰约为 60~80 亿吨,其中中国的粉煤灰产量约占 18%<sup>[1]</sup>。与发达国家相比,中国粉煤灰的平均综合利用率偏低,仅为 70%。粉煤灰的日益累积会占用大量的土地资源从而破坏耕地、改变土壤的酸碱度,进一步影响动植物、微生物生存,给环境造成巨大压力<sup>[2]</sup>。

2024 年我国粉煤灰排放量约 8.99 亿吨,综合用量约为 6.13 亿吨,仍有近 2.8 亿吨的粉煤灰未能有效利用,其处理处置和综合利用亟待解决。粉煤灰因其具有火山灰活性,可以有效替代部分水泥,在建材方面被广泛应用,但近几年来受建材行业市场下滑的影响,我国绝大部分地区粉煤灰市场都出现了量价齐降的局面,很多地方都出现了粉煤灰滞销的现象,且目前建材化产品普遍附加值较低。因此,寻求适合煤电行业粉煤灰的高值化综合利用技术具有必要性和迫切性。

孙红娟等<sup>[3]</sup>在粉煤灰的物理化学属性基础上综述了粉煤灰高值化利用现状,分析了高值化利用中主要存在的问题及发展趋势;王建新等<sup>[4]</sup>指出我国粉煤灰的资源化利用主要集中于低附加值的产业,高附加值利用领域尚处于起步探索阶段,目前粉煤灰高值利用大都局限于实验或中试规模的实验研究,许多高附加值利用领域尚存在技术瓶颈。

我国砂石骨料的用量巨大,约占全球总量的 40%,砂、石骨料年消耗量在 160~200 亿吨<sup>[5-6]</sup>。目前,作为天然骨料的卵石、河砂已基本开采殆尽,建筑业开始大量开采花岗岩、石灰石等石矿作为混凝土的粗、细骨料。而石矿属于有限的自然资源,从可持续性发展战略出发,矿山开采应受到限制。为确保资源的可持续发展,寻找混凝土骨料的替代品,如利用再生骨料及生产人造骨料替代天然骨料已成了建筑行业极具潜力的发展方向。与天然骨料相比,再生骨料会在一定程度上弱化混凝土的力学性能及耐久性<sup>[7-8]</sup>,这主要与再生骨料混凝土界面过渡区宽度较大且界面过渡区两侧的骨料和水泥石的显微硬度较低等有关<sup>[9-10]</sup>。在人造骨料方面,可以通过水泥激发或碱激发方式制备各类性能的人造骨料<sup>[11-12]</sup>。

制备粉煤灰基人造骨料主要以高温烧结和免烧结工艺为主<sup>[13-14]</sup>,其中免烧工艺更低碳环保,是目前的主要研究方向,而粉煤灰人造骨料一般作为轻质骨料使用<sup>[15-16]</sup>,作为普通类别混凝土骨料的研究及应用还比较少。为进一步降低建材行业的碳排放,解决行业天然骨料资源短缺和固废处理难题,研究采用两种不同工艺制备粉煤灰基人造骨料,骨料中粉煤灰掺量不少于 75%,一是通过掺入少量水泥来激发粉煤灰的活性制备水泥激发粉煤灰基骨料;二是通过碱激发方式制备碱激发粉煤灰基骨料,对比研究不同种类粉煤灰基人造骨料与天然骨料制备的混凝土在力学性能与耐久性方面的差异。

## 1 原材料与试验方法

## 1.1 原材料

水泥(OPC)为 52.5 硅酸盐水泥;矿渣粉(GGBS)为 S95 级矿渣粉;粉煤灰(FA)为 II 级灰,各胶凝材料的化学成分见表 1;花岗岩粗集料粒径 5~10 mm,表观密度 2 620 kg/m<sup>3</sup>;石灰石粗集料粒径 5~10 mm,表观密度 2 610 kg/m<sup>3</sup>,SKY8588 为高效聚羧酸减水剂;碱激发剂为水玻璃(工业硅酸钠),该水玻璃的模数为 3.28,固含量为 36.73%,其中 Na<sub>2</sub>O 含量为 8.79%,SiO<sub>2</sub> 含量为 27.94%,试验中采用氢氧化钠(分析纯)调节碱性激发剂的模数为 1.3,静置 24 h 待用,BaCl<sub>2</sub> 为碱激发材料缓凝剂。

表 1 原材料的化学组成

Table 1 Chemical composition of cement and other materials / %

原材料	烧失量	不溶物	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
OPC	2.67	0.22	20.18	4.77	3.60	64.22	1.25	1.89
GGBS	0.13	14.69	34.14	14.20	1.00	40.14	7.54	0.07
FA	1.30	66.91	46.14	21.60	10.85	12.03	5.48	1.48

## 1.2 粉煤灰基人造骨料及混凝土制备

## 1.2.1 粉煤灰基人造骨料制备

按表 2 及表 3 配合比用水泥胶砂搅拌机制备水泥粉煤灰人造骨料及碱激发粉煤灰骨料浆体。浆体制备完成后倒入三联试模中并放入标准养护箱养护,24 h 后取出拆模,再将样品放入可调式恒温恒湿养护箱,在 75 ℃及 100% 相对湿度条件下养护 24 h,养护完成后取出样品用破碎机将试样破碎,选取 5~10 mm 样品作为人造粗骨料。

表 2 水泥激发粉煤灰骨料配合比

Table 2 Mix proportion of cement activated fly ash artificial aggregate

样品编号	OPC/%	FA/%	水灰比 (W/C)	SKY8588/%
CFA	25	75	0.22	0.5

表 3 碱激发粉煤灰人造骨料配合比

Table 3 Mix proportion of alkali-activated fly ash artificial aggregate

样品编号	GGBS/%	FA/%	W/C	碱含量/%	BaCl <sub>2</sub> /%
AACFA	20	80	0.30	6.0	0.5

### 1.2.2 各类骨料混凝土制备

按表 4 及表 5 配合比制备各类骨料水泥混凝土及碱激发混凝土, 人造骨料用量按与天然骨料同体积量计算。混凝土制备完成后倒入试模成型并放入标准养护箱进行养护, 拆模后放入标养室进行不同龄期力学性能测试。其中 GA 为花岗岩骨料, LA 为石灰石骨料, CA 为水泥激发粉煤灰骨料, AA 为碱激发粉煤灰骨料。

表 4 不同骨料水泥混凝土配方

Table 4 Mix proportions of cement concrete with different aggregates / (kg/m<sup>3</sup>)

编号	OPC	GGBS	标准砂	骨料	水	水灰比	SKY8588
CC-GA	256	256	692	1 026	171	0.33	4.1
CC-LA	256	256	692	1 026	171	0.33	4.1
CC-AA	256	256	692	728	171	0.33	4.1
CC-CA	256	256	692	728	171	0.33	4.1

表 5 不同骨料碱激发混凝土配方

Table 5 Mix proportions of alkali-activated concrete with different aggregates / (kg/m<sup>3</sup>)

编号	GGBS	FA	标准砂	骨料	水	水玻璃	水胶比	BaCl <sub>2</sub>
AAC-GA	102	408	692	1 026	98	139	0.33	2.6
AAC-LA	102	408	692	1 026	98	139	0.33	2.6
AAC-AA	102	408	692	728	98	139	0.33	2.6
AAC-CA	102	408	692	728	98	139	0.33	2.6

### 1.3 试验方法

天然骨料采用原石加工成 40 mm × 40 mm × 160 mm 棱柱体, 与水泥激发粉煤灰骨料及碱激发粉煤灰骨料形状一致, 各类骨料及不同骨料制备的混凝土力学性能检验方法参照 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》进行。

参考国标 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中的快速氯离子迁移法 (RCM 法), 对不同骨料混凝土抗氯离子扩散性能进行研究。

采用扫描电镜对参考表 4、表 5 配方 (去除细骨料) 制备的 28 d 龄期样品微观结构进行观测, 主要

观察水泥浆体与各类骨料的界面过渡区宽度、界面过渡区的主要产物及形貌等。

## 2 结果与讨论

### 2.1 各类骨料的基本性能

通过力学性能测试得到碎石花岗岩及石灰石骨料的抗压强度均超过 150 MPa, 人造骨料的抗压强度比天然骨料要低很多, 其中水泥激发粉煤灰基人造骨料的平均抗压强度达到 66.7 MPa, 碱激发粉煤灰基人造骨料的平均抗压强度达到 68.2 MPa。天然骨料的抗折强度超过 10 MPa, 石灰石骨料的抗折强度最高为 16.3 MPa, 水泥激发粉煤灰基骨料的抗折强度为 8.5 MPa, 与花岗岩的抗折强度较接近, 而碱激发粉煤灰基骨料的抗折强度仅有 4.6 MPa, 这说明碱激发粉煤灰基骨料的韧性较差。

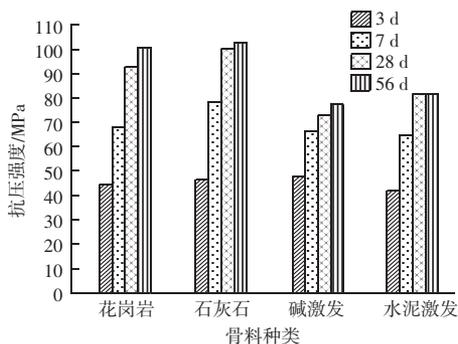
粉煤灰基人造骨料主要呈灰色, 棱角形貌与普通破碎天然骨料相似, 其中, 人造骨料的棱角较为突出, 相似的棱角度保证了人造骨料搭建“骨架”的力学强度。人造骨料表面有较多的孔隙, 特别是碱激发粉煤灰基骨料的孔隙比较多, 人造骨料中孔隙主要是受材料特性影响, 如粉煤灰中残留的氨离子在遇到碱性物质后反应生成气体存在于浆体中, 而对于水泥激发粉煤灰基材料因其凝结时间比较长, 低水灰比浆体流动性好, 具有自密实性能, 气泡会逐步消散, 而碱激发粉煤灰基材料的凝结时间相对较短, 气泡较难完全排出, 因此浆体的气泡含量相对较高, 这也是导致人造骨料吸水率高的主要原因。

### 2.2 各类骨料对混凝土力学性能的影响

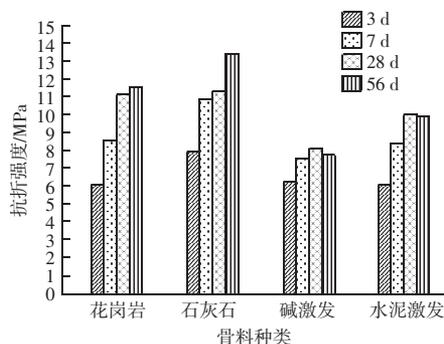
由图 1 可知, 在标养情况下, 随着龄期的延长, 掺各类骨料水泥混凝土的抗压强度逐渐升高, 掺花岗岩水泥混凝土 56 d 抗压强度最高为 102.5 MPa, 掺水泥激发及碱激发人造骨料的水泥混凝土 56 d 抗压强度较为接近, 分别为 81.3、77.2 MPa, 相比于天然骨料, 人造骨料制备的混凝土抗压强度约为天然骨料的 75%, 用人造骨料可以制备出抗压强度超过 C60 等级的混凝土。在抗折强度方面, 掺石灰石水泥混凝土 56 d 抗折强度最高为 13.3 MPa, 掺花岗岩及掺水泥浆骨料的抗折强度分别为 11.5、9.8 MPa, 掺碱激发骨料的抗折强度最低为 7.8 MPa。在胶凝材料相同的情况下, 混凝土抗折强度与骨料特性有关,

## 材料科学

一般来讲,浆体与骨料结合的界面区是混凝土力学性能最薄弱的区域,对抗折强度影响最大,与同为人造骨料的水泥激发人造骨料相比,碱激发人造骨料的抗折强度要低很多,主要与不同骨料的界面特性有关,水泥激发骨料中水泥含量较少,主要以粉煤灰为主,水泥粉煤灰硬化体的 pH 值要低于新拌水泥浆体,当新拌水泥浆体与水泥激发骨料接触后,新拌水泥浆体的高碱新环境进一步激发水泥激发人造骨料中未完全反应的粉煤灰,从而增加界面区的黏结力。对于新拌水泥浆体与碱激发人造骨料形成的界面区则存在完全不一样的情况,碱激发人造骨料中自身存在一定量的未完全反应的碱,当遇水湿润后将会重新释放出碱,高碱环境会弱化界面区的二次反应,从而降低混凝土的韧性。



(a) 抗压强度



(b) 抗折强度

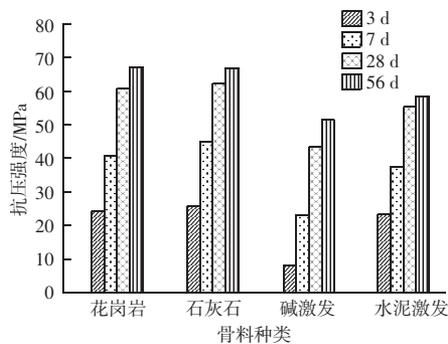
图1 各类骨料水泥混凝土力学性能对比

Fig. 1 Comparison of mechanical properties of cement concrete with different types of aggregates

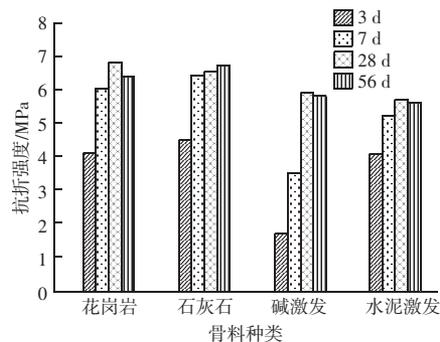
由图2可知,在标养情况下,随着龄期的延长,掺各类骨料碱激发混凝土的抗压强度逐渐升高,掺花岗岩及石灰石碱激发混凝土56 d抗压强度较接近,分别为66.9、66.5 MPa,掺水泥激发人造骨料及碱激发人造骨料的碱激发混凝土56 d抗压强度分别为58.1、51.0 MPa,其中掺碱激发人造骨料的早期强

度较低,后期强度持续上升。在抗折强度方面,掺花岗岩及石灰石碱激发混凝土56 d抗折强度较接近,分别为6.4、6.7 MPa,掺水泥激发及碱激发骨料的56 d抗折强度也较接近,分别为5.6、5.8 MPa。

碱激发粉煤灰基混凝土的抗压、抗折强度比水泥混凝土要低,其中以碱激发人造骨料制备的各类混凝土力学性能最差,这可能与碱激发骨料表面多孔及自身特性有关。无论是作为掺合料的粉煤灰,还是作为骨料的粉煤灰基体,它们的后期水化都需要水,这可能导致体系内部湿度降低,引发自干燥效应和自收缩。混凝土的自收缩会在内部产生拉应力,从而在界面过渡区(ITZ)和水泥石本体中产生微裂纹。随着水化的进行,水泥浆体内部湿度下降,骨料中吸收的水分会被释放出来,继续水化骨料周围的水泥。然而,这种持续的水化会导致ITZ区域内水化产物(如氢氧化钙CH和钙矾石AFt)的不断生长和重排。这种长期的、局部的化学和微观结构变化会在ITZ产生内应力。水化产物的结晶压力可能撑开已经形成的密实结构,在ITZ引入更多的微裂纹,从而劣化界面过渡区性能。



(a) 抗压强度



(b) 抗折强度

图2 各类骨料碱激发混凝土力学性能对比

Fig. 2 Comparison of mechanical properties of alkali-activated concrete with different types of aggregates

### 2.3 掺各类骨料水泥混凝土抗氯离子扩散性能

由图 3 (a) 可知, 随着龄期的延长, 各类骨料水泥混凝土的抗氯离子扩散系数均会降低, 这说明长期的水化反应有利于提升水泥混凝土的抗氯离子扩散性能, 在水泥混凝土中掺石灰石骨料的混凝土 28 d 抗氯离子扩散系数比较低, 低于  $2.00 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 掺碱激发骨料的水泥混凝土最高, 为  $5.78 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 掺水泥浆骨料与掺花岗岩骨料较接近, 在胶凝材料及细骨料一致的情况下出现如此大的差异说明粗骨料对混凝土抗氯离子扩散性能有很大影响, 这主要和骨料与水泥浆中的界面区性能有关。

由图 3 (b) 可知, 随着龄期的延长, 各类骨料碱激发混凝土的抗氯离子扩散系数均会降低, 这说明随着聚合反应龄期的增长有利于提升碱激发混凝土的抗氯离子扩散性能, 掺花岗岩及石灰石骨料的碱激发混凝土抗氯离子扩散系数比较接近, 掺碱激发骨料的混凝土 28 d 抗氯离子扩散系数最高为  $12.00 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 掺水泥激发粉煤灰骨料的碱激发混凝土 56 d 氯离子扩散系数降低最显著, 56 d 氯离子扩散系数低于掺天然骨料的混凝土, 这说明碱激发粉煤灰材料与水泥激发粉煤灰骨料有良好的相容性, 碱激发浆体与水泥粉煤灰骨料结合的过程中, 碱激发材料中的碱性物质再次与骨料中未反应的粉煤灰颗粒发生反应并生成新的产物, 从而提高界面区的密实性。碱激发混凝土中使用的胶凝材料主要是粉煤灰, 其中含有大量残留的氨盐, 在粉煤灰遇水后氨盐通过溶解及反应, 生成大量细小的气泡, 影响混凝土的抗渗性能。

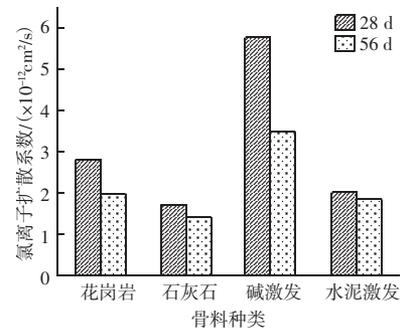
综上所述, 各类骨料水泥混凝土的抗氯离子扩散系数比碱激发混凝土要低 1/2 左右, 即水泥混凝土的抗氯离子扩散优于碱激发混凝土, 这与胶凝材料的特性有关, 水泥及矿渣在低水灰比情况下形成的浆体致密性高、孔隙率低, 而碱激发粉煤灰地聚物内部孔隙较多, 致密性较差。

水泥基材料的水化产物主要是 C-S-H 凝胶、氢氧化钙 (CH)、钙矾石 (AFt) 等。而碱激发材料的主要产物可能包括低钙的硅铝酸盐凝胶, 比如 N-A-S-H 或 C-A-S-H, 这取决于原材料和激发剂的类型。当这两种材料接触时, 界面处可能会发生

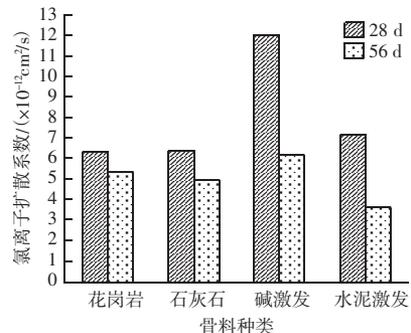
离子交换, 或者生成新的产物。例如, 水泥基中的 CH 可能会与碱激发材料中的活性硅铝酸盐反应, 形成新的凝胶或晶体结构, 这可能会对界面的黏结强度和耐久性产生影响。

界面过渡区 (ITZ) 在水泥基材料中通常是一个薄弱区域, 此处的水灰比较高, 晶体较大, 孔隙较多。当水泥基材料与碱激发材料接触时, ITZ 的结构可能会发生变化。例如, 碱激发材料中的高碱性环境可能会溶解水泥基中的某些成分, 或者促进更致密的产物形成, 从而改善 ITZ 的性能。但反之, 如果两种材料的反应产物不兼容, 可能会导致界面处结构疏松, 强度下降。

在物理性能方面, 两种材料的收缩率也可能不同。水泥基材料在硬化过程中会产生干燥收缩, 而碱激发材料有较高的自收缩。这种差异可能导致界面处产生微裂缝, 从而影响力学性能。此外, 两种材料的孔隙结构不同, 碱激发材料通常孔隙更细, 但总孔隙率更高, 这会影响界面处的渗透性和离子迁移。



(a) 水泥混凝土



(b) 碱激发混凝土

图 3 不同骨料混凝土抗氯离子扩散系数  
Fig. 3 Chloride ion diffusion coefficient of concrete with different aggregates

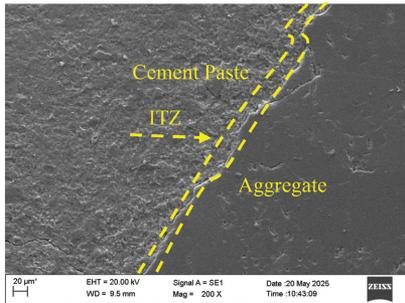
## 材料科学

### 2.4 水泥混凝土界面过渡区形貌分析

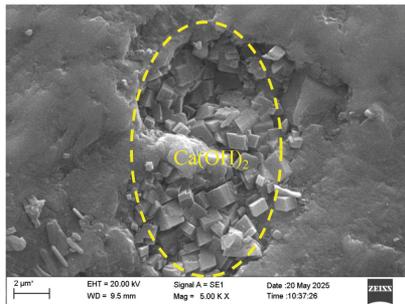
以无细骨料水泥混凝土为研究对象, 取样进行浆体与骨料界面过渡区特性分析。

#### 2.4.1 水泥浆体与天然骨料界面区特性研究

由图 4 可知, 水泥浆与天然骨料花岗岩界面区黏结比较紧密, 界面区分界比较明显, 宽度在  $20 \sim 30 \mu\text{m}$ , 界面过渡区主要水化产物是方块状的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  及无定型凝胶, 大量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  积聚增大了界面过渡区的孔隙率, 削弱了界面过渡区的性能。



(a) 界面过渡区宽度



(b) 界面过渡区水化产物

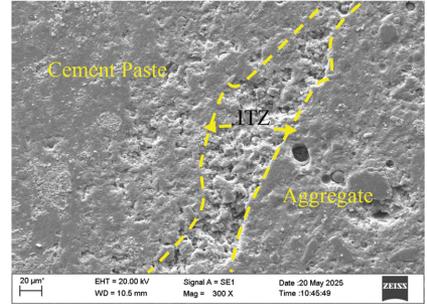
图 4 水泥浆与花岗岩骨料界面过渡区形貌及主要水化产物  
Fig. 4 Morphology of ITZ between cement paste and granite aggregate interface and main hydration products

#### 2.4.2 水泥浆体与人工骨料界面区特性研究

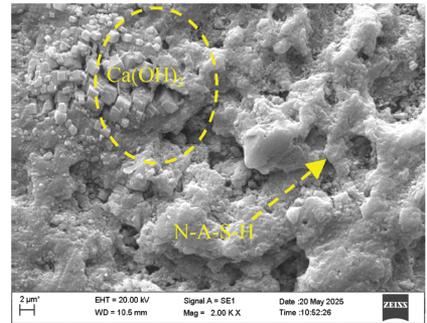
由图 5 可知, 水泥浆与碱激发人工骨料界面过渡区较为明显, 界面过渡区结构相对比较疏松, 界面过渡区两边产物形貌相差不大, 界面过渡区宽度在  $30 \sim 40 \mu\text{m}$ 。水泥浆体与碱激发骨料界面过渡区主要水化产物是方块状的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  及无定型 N-A-S-H 凝胶等, 凝胶内部结构比较疏松。

### 3 结论

通过水泥激发及碱激发方式制备粉煤灰基人造骨料, 对比人造骨料与天然骨料的力学性能、耐久性及微观特性, 证实了人造骨料在混凝土中应用的



(a) 界面过渡区宽度



(b) 界面过渡区水化产物

图 5 水泥浆与碱激发人工骨料界面过渡区形貌及主要水化产物  
Fig. 5 Morphology of ITZ between cement paste and alkali-activated artificial aggregate interface and main hydration products

可行性, 研究得到以下结论:

(1) 与天然花岗岩及石灰石骨料相比, 用人造骨料可以制备出抗压强度为  $77.2 \text{ MPa}$  的水泥混凝土及抗压强度为  $58.2 \text{ MPa}$  的碱激发粉煤灰混凝土, 约为天然骨料抗压强度的  $75\%$ , 其中水泥激发粉煤灰骨料力学性能优于碱激发粉煤灰骨料力学性能。

(2) 水泥浆与天然骨料花岗岩及石灰石界面区黏结比较紧密, 界面过渡区宽度在  $20 \sim 30 \mu\text{m}$ , 界面过渡区主要水化产物是  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  及无定型凝胶; 水泥浆与碱激发人工骨料界面过渡区黏结比较紧密, 界面过渡区结构较疏松, 界面过渡区宽度在  $30 \sim 40 \mu\text{m}$ , 界面过渡区主要水化产物是少量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  及无定型凝胶等。

(3) 界面过渡区结构决定了混凝土的力学性能及耐久性, 各类浆体与天然骨料界面过渡区宽度较小且连接比较紧密, 提升了混凝土的力学性能的耐久性; 浆体与人工骨料界面过渡区宽度较宽且结构比较疏松, 会弱化界面区的力学性能及耐久性, 其中水泥激发人工骨料抗氯离子扩散性能与天然骨料较接近, 优于碱激发人工骨料。

## 参 考 文 献

- [1] DING J, MA S H, SHEN S, et al. Research and industrialization progress of recovering alumina from fly ash: A concise review [J]. *Waste Management*, 2017, 60 (11): 375-387.
- [2] 姜龙. 燃煤电厂粉煤灰综合利用现状及发展 [J]. *洁净煤技术*, 2020, 26 (4): 31-39.
- [3] 孙红娟, 曾丽, 彭同江. 粉煤灰高值化利用研究现状与进展 [J]. *材料导报*, 2021, 35 (3): 3010-3015.
- [4] 王建新, 李晶, 赵仕宝. 中国粉煤灰的资源化利用研究进展与前景 [J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37 (12): 3833-3841.
- [5] TAM V W Y, SOOMRO M, EVANGELISTA A C J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000 - 2017), *Construction and Building Materials*, 2018, 172: 272-292.
- [6] 胡幼奕, 张朋, 赵婧. 当前我国砂石行业面临的问题及对策 [J]. *中国建材*, 2021 (1): 128-130.
- [7] 陈鹏博, 李北星, 曾波. 再生粗骨料粒径对混凝土力学和耐久性能的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42 (10): 3679-3687.
- [8] 元成方, 李爽, 曾力, 等. 砖矸混合再生粗骨料混凝土力学性能研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37 (2): 398-402.
- [9] LIU J, MA K L, SHEN J T, et al. Influence of recycled concrete aggregate enhancement methods on the change of microstructure of ITZs in recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 371: 130772.
- [10] LU CH G, YU Q J, WEI J X, et al. Influence of interface transition zones (ITZ) and pore structure on the compressive strength of recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 456: 139299.
- [11] ZHANG Z H, LIU J L, LIU S H, et al. Preparation of artificial aggregates with high fly ash content through air Curing and carbonation curing [J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 461: 139874.
- [12] QIAN L P, HUANG B T, XU L Y, et al. Concrete made with high - strength artificial geopolymer aggregates: Mechanical properties and failure mechanisms [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 376: 130318.
- [13] 商效瑛, 黄文逸, 方泽宇, 等. 人工冷粘结轻骨料高强混凝土制备及性能 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42 (2): 1005-1013.
- [14] 黄京立, 侯杰, 郑沛祺, 等. 粉煤灰-矿渣基免烧人造轻集料的制备及性能研究 [J]. *材料导报*, 2024, 38 (13): 150-158.
- [15] ANJA T, LATO P, VOJISLAV M, et al. Artificial fly ash based aggregates properties influence on lightweight concrete performances [J]. *Ceramics International*, 2015, 41: 2714-2726.
- [16] ROHIT R, DINAKAR P. Evaluating the corrosion resistance and LCA of lightweight geopolymer concrete integrating sintered fly ash aggregate as coarse aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 449: 138370.
- [1] 建设 (中英文), 2025, 45 (增刊1): 1-10.
- [6] 梁玉强, 徐文礼, 丁庆军, 等. 高钛重矿渣轻骨料对盾构隧道管片混凝土性能的影响 [J]. *混凝土*, 2022 (6): 142-146.
- [7] 吴群威, 赵娣. 粉煤灰对混杂纤维混凝土力学与耐久性能的影响分析 [J]. *当代化工*, 2023, 52 (2): 273-276.
- [8] 王晗. 混杂纤维对铁路工程粉煤灰混凝土力学与耐久性能的影响研究 [J]. *当代化工*, 2022, 51 (12): 2806-2809.
- [9] 顾展飞, 全鑫, 刘之葵. 玄武岩纤维对沙漠砂高强混凝土性能研究 [J]. *混凝土*, 2022 (11): 46-50.
- [10] 惠存, 王森林, 李克, 等. 矿物掺合料和纤维复掺对混凝土力学性能的影响研究 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2021 (12): 55-58.
- [11] 杨志刚, 董世博, 仲小玲, 等. 纤维增强粉煤灰混凝土耐久性研究 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2025, 39 (3): 23-27, 48.
- [12] 张英兰. 玄武岩-剑麻纤维改性粉煤灰混凝土力学与耐久性性能试验研究 [J]. *精细化工中间体*, 2024, 54 (6): 46-51.
- [13] 纪龙平. 粉煤灰对玄武岩纤维轻集料混凝土力学性能的影响研究与工程应用 [J]. *福建建材*, 2024 (12): 6-9.
- [14] 丁大伟, 郭子涵, 张伟, 等. 粉煤灰和钢纤维对超高性能混凝土抗冲磨性能的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43 (10): 3585-3594.
- [15] 罗加辉, 龚爱民, 邵善庆, 等. 碱激发混杂玄武岩纤维粉煤灰混凝土耐久性研究 [J]. *水力发电*, 2024, 50 (8): 94-102.

(上接第 24 页)