

预制型无机石材的研究进展与应用现状

雷 翅^{1,2}, 黄 晓^{1,2}, 徐海军^{1,2}, 胡贺松^{1,2}, 唐孟雄^{3,4}

¹广州市建筑科学研究院集团有限公司, 广东 广州

²广东原创新材料科技有限公司, 广东 广州

³广州建筑股份有限公司, 广东 广州

⁴广州市建筑集团有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2023年11月15日; 录用日期: 2023年12月12日; 发布日期: 2023年12月20日

摘 要

预制型无机石材是一种新型无机人造石, 它综合利用废弃资源制成, 具有高效资源利用率、节能低碳环保的特点。本文从预制型无机石材的研究现状、形成机理、改性技术及存在问题等方面进行综述。

关键词

无机板材, 矿物掺合料, 性能, 微观结构

Research Progress and Application of Prefabricated Inorganic Stone

Chi Lei^{1,2}, Xiao Huang^{1,2}, Haijun Xu^{1,2}, Hesong Hu^{1,2}, Mengxiong Tang^{3,4}

¹Guangzhou Institute of Building Science Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

²Yuan Chuang New Materials & Technology Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

³Guangzhou Construction Engineering Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

⁴Guangzhou Municipal Construction Group Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: Nov. 15th, 2023; accepted: Dec. 12th, 2023; published: Dec. 20th, 2023

Abstract

Prefabricated inorganic stone is a new type of inorganic artificial stone, which is made by the comprehensive use of waste resources, with high-efficiency resource utilisation, energy saving and low-carbon environmental protection. This paper reviews the research status, formation mechanism, modification technology and problems of prefabricated inorganic stone.

Keywords

Inorganic Plates, Mineral Admixtures, Performance, Microstructure

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

预制型无机石材(俗称“预制水磨石”)是以天然石材回收料、粉体为原料,经无机胶凝材料胶结,在工厂规范化生产而成的环保新型建材[1] [2]。它具备高效资源综合利用率、节能环保等优点,是发展绿色建材的重要途径。随着经济快速发展和环保要求提高,高质量预制型无机石材的市场需求日益增加。相比早期产品,现代预制型无机石材表面经过处理可获得良好装饰效果,兼具力学性能和美观性。由于可设计性强、耐久性好、装饰效果佳,被广泛应用于各类公共建筑和家居装修。近年来,这一新材料成为行业研究热点。

2. 研究与应用现状

2.1. 预制型无机石材研究现状

属于人造石的一种,人造石的起源可追溯到古希腊古罗马,直至今日,人造石仍是工程上重要的材料之一。随着学者的探索和实践应用,对人造石的内部结构及水化机理有了更深刻的认识,为新品种的发展提供了理论依据,预制型无机石材是人造石满足现代建筑需求和审美发展的产物。预制型无机石材所用无机胶凝材料胶结主要包括矿粉水泥基复合材料、硅灰水泥基复合材料、偏高岭土水泥基复合材料以及多元复合胶凝体系。

1) 矿粉水泥基复合材料

矿粉中的主要成分为 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 ,由硅酸二钙(C_2S)、钙长石(CAS_2)、钙铝黄长石(C_2AS)、钙镁黄长石(C_2MS_2)组成。其中,常温下只有 C_2S 具有水硬性。矿粉晶体由玻璃相和结晶相组成,玻璃相中含有许多活性成分,具有一定活性;而结晶相较为稳定。矿粉中玻璃相含量约为 85%,因此矿粉具有较高的活性。

关于矿粉活性的影响因素,研究表明矿渣玻璃相由含硅相和含钙相组成,含钙相在碱性环境下化学反应活跃,因此钙相含量越高,矿粉活性越强。此外,玻璃相的网络结构也影响矿粉活性, Si 是网络形成体, Ca^{2+} 是网络改变体, Al 和 Mg 是中间体,因此网络改变体和中间体含量越高,玻璃相活性越强,矿粉活性也越高。

尽管矿粉活性强,但与水反应缓慢。常用的激发措施包括物理激发(机械破碎、高温处理等)和化学激发(酸碱处理等)。酸处理可增加矿粉的比表面积和孔隙率,有利于早期强度发展;而碱处理可促进矿粉中钙相的水化反应,使硅相填充胶凝产物间隙,提高混凝土密实度,有利于后期强度稳定。

Okiemute [3]利用 TGA、XRD 等技术探究温度、碱性对矿粉水化程度的影响,以及矿粉对混凝土微观结构和耐久性的影响。结果表明,温度升高有利于矿粉水化;碱性矿渣活化能强,水化程度高[4];掺矿粉可提高混凝土抗氯离子渗透性[5];国内研究也发现,矿粉可促进水泥水化,提高抗折强度[6];可以优化大体积混凝土的温控性[7];并可以不同程度提高混凝土抗氯离子渗透性、抗碳化性和抗冻融性[8];

微观分析显示, 矿粉可提高混凝土密实度, 减少孔隙率[9]。此外, 适量掺入矿粉有利于改善混凝土的早期抗裂性。

综上, 国内外对矿粉的活性机理、改性方法以及其对水泥和混凝土性能的影响进行了广泛研究。但尚需深入对比不同矿粉类型、掺量比例、使用环境等条件下的结构与性能关系, 以充分发挥矿粉的优势和潜力。

2) 硅灰水泥基复合材料

硅灰又称微硅粉(Silica fume, 简称 SF), 是冶炼硅或硅铁过程中形成的微细 SiO_2 粉末, 粒径在 $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$ (如图 1), 比表面积高达 $1.5 \times 10^4\sim 2.0 \times 10^4\ \text{m}^2/\text{kg}$ 。作为高活性火山灰质材料, SF 可显著提升水泥和混凝土的性能。

国外 20 世纪 50 年代即开始研究 SF, 80 年代开始工业应用[10]。Goran [11]等人的研究表明, 适量掺入 SF 可提高混凝土的抗压强度、流动性、致密性和界面结合力, 并改善耐久性。SF 的反应活性直接影响其增强效果[12]。Caliskan [13]通过热重分析等手段研究了 SF 的水化机理, 发现一定量的 SF 参与化学反应, 并通过填充效应提高混凝土的稠密度。

国内外研究表明, SF 可显著提高混凝土抗压强度, 改善微观结构和界面结合力。但不同粒径或处理方法的 SF 的反应活性不同, 因此需优化配比设计。小粒径、高比表面积的 SF 活性强, 既发挥化学活性又具填充效应, 强度增效更明显[14]。SF 也可增强混凝土的抗渗透性和抗腐蚀性。在一定掺量范围内, 强度随掺量增加。但过高掺量时强度增长趋于平缓[15]。综合来看, SF 是一种高效的微观填充材料和活性掺合料, 具有广阔的应用前景。但尚需深入研究不同条件下的增强机理, 以实现性能的可控优化。

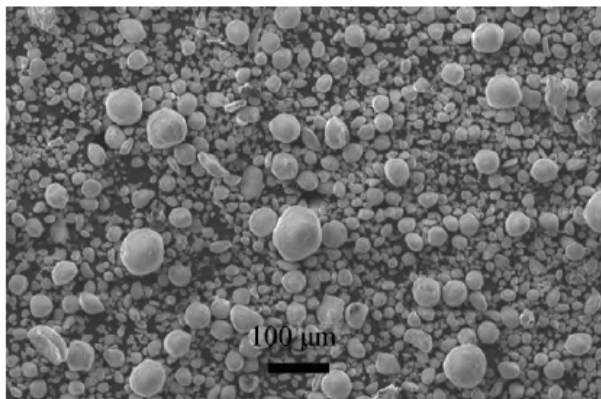


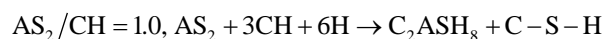
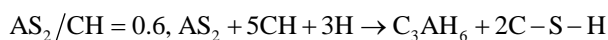
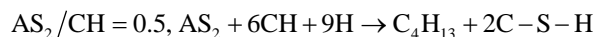
Figure 1. The SEM of Silica fume

图 1. 微硅粉的 SEM 图

3) 偏高岭土水泥基复合材料

偏高岭土是由高岭土($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$)经高温($500^\circ\text{C}\sim 900^\circ\text{C}$)煅烧后形成的一种无定形硅酸铝盐化合物[16], 具有较高的化学活性和火山灰活性。其可与水泥水化产物 CH 发生反应, 生成 C-S-H 等具有较高强度的水化产物。

Tazawa [17]研究发现偏高岭土(AS_2)与 CH 的比值不同, 其水化产物也不同, 具体表现为:



掺入偏高岭土可以改善水泥浆体或混凝土的微观结构, 提高物理力学性能。其主要作用机理体现在:

a) 填充效应。偏高岭土颗粒粒径较小，比表面积较小，通过在水泥浆中添加偏高岭土来填充毛细孔隙，将孔隙中的水分置换出从而增加浆体自由水的含量，使浆体更加密实；

b) 火山灰效应。由于偏高岭土具有许多断裂的化学键和较高的表面能，可以吸收一部分 CH ，二次水化形成具有凝胶化作用的 C-S-H ，并提高水泥浆体的物理力学性能，并提高耐久性；

c) 提高水泥水化反应速率。偏高岭土中的 Al_2O_3 和 SiO_2 在碱激发条件下可与其他离子结合生成一种网状结构，可提高水泥水化反应速率，使早期强度增加。

Nabil [18]等人发现掺入偏高岭土可提高混凝土的界面结合力、致密性和抗碳化能力，并持续促进后期强度增长。同时，偏高岭土可改善水泥浆体流变性，并与硅酸盐反应生成 C-S-H ，调整 C-S-H 各组分的比例，增强混凝土性能。掺入偏高岭土的超高性能混凝土经热处理后可达 250 MPa [12]。

国内学者经过研究也证实偏高岭土可提高混凝土强度[19]，并通过电化学测试手段研究了其促进水泥水化的机制[20]。偏高岭土还可显著提高混凝土的抗氯离子渗透性，并具有核化效应和填充效应。不同掺量及类型的偏高岭土对混凝土性能的影响各有差异。过高掺量时强度增效趋于平缓。

总体来看，偏高岭土是一种高活性掺合材料，可显著提升混凝土的早期和后期强度、抗渗性及微观结构。但其增强机制和优化用量还有待进一步深入研究，以发挥其更大应用潜力。

4) 多元复合胶凝体系

随着水泥制造业的不断发展，水泥基体系理论的不断进步和完善。为满足不同试验及工程要求，目前人们对掺入多元矿物掺合料水泥基进行深入研究，探究多元体系水泥基新型复合胶凝材料的水化进程，通过不同试验进行表征，优化配比，以此提升物理力学性能，优化微观结构。不同矿物掺合料可以发生协同效应，在降低环境负荷、减少生产成本的同时，提高其力学性能及耐久性能。当前研究热点包括：配比优化、水化机理、微观结构、力学性能等。

国外学者 Masih [21]等人利用 SF 和两种偏高岭土代替部分水泥修复混凝土研究其粘结强度影响因素，结果表明火山灰质材料代替部分水泥可提升砂浆的抗压强度；B 型偏高岭土可提高粘结强度，在掺入火山灰质材料的同时必须考虑界面粘合剂的选用。Lemonis N [22]等人将天然火山灰和镍铁渣掺入水泥中制备三元复合胶凝材料，结果显示天然火山灰和镍铁渣的掺入可延缓复合胶凝材料早期水化速率，有利于后期强度发展，在碱性环境下非晶态硅酸盐质溶解并与硅酸盐反应生成 S-C-H 凝胶，使微观结构更加密实，对于废物再利用实践具有显著环境效益。

国内贾艳涛[23]研究发现将矿渣和粉煤灰加入水泥中，通过测定不同掺量二元、三元体系水泥基材料的孔隙率、水化产物，建立水化反应的数学模型，并探究各龄期孔径分布与水化进程的关系，综合分析得出不同条件下的二元、三元最佳掺量配比。郑玉飞[24]采用 SF 和粉煤灰微珠配制低水胶比水泥基新型复合胶凝材料浆体，探究不同水胶比、养护方式下水泥基新型复合胶凝材料的力学强度、孔径分布，分析不同影响因素对宏观力学强度的影响程度及机理，建立其硬化浆体宏观与微观之间的联系，并得出孔隙结构对复合胶凝材料的影响显著，胶凝材料的水化影响不大。

国内外都在积极探索多元矿物掺合料水泥基体系，以发展新型复合胶凝材料。这可降低环境负荷，提高材料综合性能。

2.2. 预制型无机石材水化形成机理研究概况

1) 硅酸盐水泥水化机理

从矿物组分角度分类，可以把水泥分为硅酸盐水泥、铝酸盐水泥和硫铝酸盐水泥，其中最为世人所熟悉且广泛应用的硅酸盐水泥又称波特兰水泥。由于其原料易得，性能稳定等优点，硅酸盐水泥被世人广泛应用。硅酸盐水泥是由多矿物组合而成，其主要由硅酸三钙(C_3S)、硅酸二钙(C_2S)、铝酸三钙(C_3A)

和铁铝酸四钙(C_4AF)这四种矿物成分组成,在一般硅酸盐水泥中,各矿物成分的含量分别在 45%~60%, 15%~30%, 6%~12%, 6%~8%。 $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 系统中硅酸盐水泥所在区域如图 2 所示。

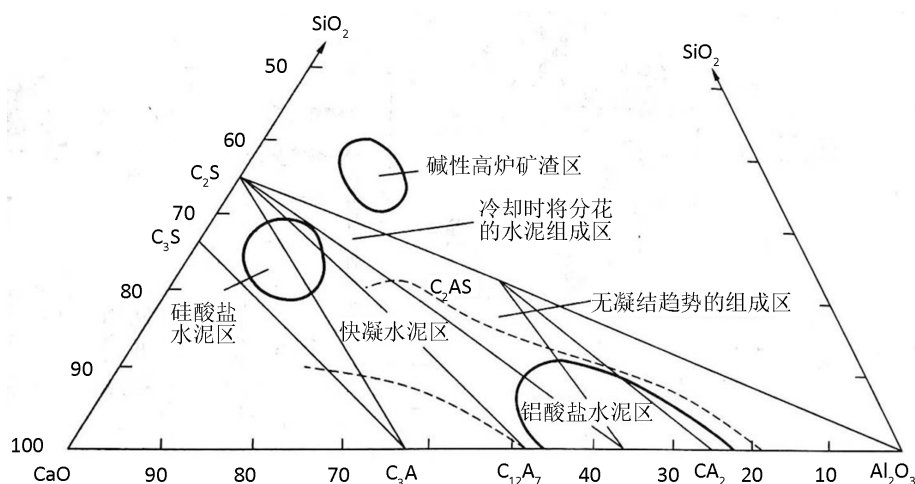


Figure 2. Silicate cement zones in $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ systems

图 2. $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 系统中硅酸盐水泥区

尽管硅酸盐水泥力学强度性能良好,凝结时间适中,但也存在缺点:水化反应放出的热量可以加速水泥硬化,但集中的水化放热反而会导致裂缝产生。因此,国内外学者通过加入不同的胶凝材料或外加剂调整水泥的水化进程,进而改善其各项性能。

2) 胶凝材料的活性效应

各类胶凝材料作为矿物掺合料掺入水泥基中会对其性能产生影响,其主要作用机理有以下五点:

1) 形态效应

在水泥浆或混凝土中添加矿物外加剂可以提高工作性能,形成各种胶凝材料颗粒的外观、表面性能、颗粒级配和圆度、色度和密度等物理性能的影响,称为形态效应[25]。形态效应可以使胶凝材料体系堆积紧密、结构致密,达到减水增塑的效果;这一效应会影响其他效应的作用,常常被看作为水泥基人造石中的基本效应之一。

2) 微集料填充效应

水泥颗粒可以填充细骨料之间的空隙,可将某些胶凝材料看作是填充水泥颗粒之间空隙的微集料[26]。Aim 和 Goff 模型理论中将矿物掺合料与水泥体系混合的体系看作是一个多组分体系,该体系中存在一个最紧密堆积值,该值受矿物掺合料颗粒与水泥颗粒的直径比影响,并与该比值成反比。

3) 火山灰效应

火山灰质材料与水泥水化生成的 CH 发生二次反应,生成有利于强度发展的 $C-S-H$ [27]。火山灰质材料+ $C-H+H \rightarrow C-S-H$ 火山灰效应具有三个特点:反应速度缓慢,从而导致放热和强度发展速率也较慢;该反应可消耗水泥水化产生的 CH ,从而改善胶凝材料水泥基体系在酸性环境下的耐久性;火山灰反应生成的产物可以有效填充毛细孔隙,从而提高体系的强度和抗渗性,火山灰反应使骨料界面中的 CH 晶体颗粒变小,降低了水泥颗粒之间的孔隙率,增加了骨料界面的内聚力,提高了混凝土的物理力学性能。

4) 界面效应

在靠近集料表面的区域中胶凝材料颗粒的堆积密度明显较低,在集料表面附近浆体的孔隙率高于其他部分,为水化过程中 Ca^{2+} , Al^{3+} , SO_4^{2-} 等离子迁移提供通道,因此在集料表面 CH 及 AFt 晶体较为富集。

5) 协同效应

在复合胶凝材料的多元体系中，不同的胶凝材料可以实现优势互补的协同效应，降低生产成本同时提高混凝土耐久性。

2.3. 预制型无机石材的改性研究

相比于天然石材，预制型无机石材硬度高、耐腐蚀、耐污染、花色丰富并具有较强的经济性，成为代替天然石材的理想材料。自上世纪 60 年代人造石材兴起以来，因其质感优良、性质稳定、耐磨和耐久性良好等特性而备受国外发达国家欢迎[28]。近年来，随着水泥水化和骨料级配搭配理论研究的深入，在原有传统的预制型无机石材基础上，通过加入有机树脂或活性掺和填充料(如粉煤灰、SF、高炉矿渣、石灰粉和其他替代无机人造石水泥粘结剂的材料)等手段来对胶凝材料进行改性[29]。

以往国内外主要利用水泥的粘结性能制备人造石，如压制获得平板岩，或注浆成型后抛光制得大理石。已有研究表明，在传统工艺基础上加入有机树脂、活性掺料(如粉煤灰、硅灰、矿渣等)可提高人造石的性能，如表 1 所示，Papayianni [30]设计了仿天然石材的低成本人造石用于古城修复；范晓玲[31]以石英砂为骨料，白水泥为胶结料，加入乳液、减水剂等，并掺入偏高岭土或水镁石纤维改性，获得性能优异的预制型无机石材；伍政华[32]等采用真空挤出工艺制备高性能预制型无机石材，研究了工艺、材料、设备等；张国明[33]等探究白水泥和玻璃微粉替代对预制型无机石材力学性能的影响。清华大学王振波[34]采用喷水硬化工艺制造了玻璃纤维编织网增强预制型无机石材，试验研究了配网率和纤维编织网定位方式对其抗弯性能的影响。尽管国内外对聚合物改性预制型无机石英石进行了一定探索，但获得高性能产品的报道不多。

Table 1. The improvement methods of prefabricated inorganic stone

表 1. 预制型无机石材的改性方法

| 作者 | 改性方法 | 改性结果 |
|-----------------|-----------------|--------------------|
| Papayianni [30] | 人造无机石替代原石 | 降低成本 |
| 范晓玲[31] | 加入偏高岭或水镁石纤维 | 弯曲强度及压缩强度得到提升 |
| 伍政华[32] | 真空挤出工艺制备预制型无机石材 | 提高生产效率，降低成本 |
| 张国明[33] | 加入白水泥、碎玻璃 | 促进水泥水化反应，提升人造石力学性能 |
| 王振波[34] | 提高板材玻璃纤维编织网配网率 | 抗弯性能良好 |

3. 存在的问题

目前，人造石材市场需求量较大，在客流量大的建筑空间和静置的餐厅、厂房、商场等建筑空间领域持续增长。受城镇化进程、对装饰材料的个性化、高端化需求使得高品质预制型无机石材具有广阔的应用前景。如今预制型无机石材的优势已逐渐被社会所认知，但仍存在以下几个问题限制其发展。

1) 不同厂家制备技术、制备装备水平等不同，制备出的产品品质参差不齐，如致密性不足、气孔多、光泽度不足、耐磨性差、收缩变形大等，且未有相匹配的科学、规范装饰应用技术做支撑，造成工程应用过程中越来越多的问题出现，如常见的开裂、黑缝、水斑、空鼓、耐污性差等，较大地制约了预制型无机石材的推广应用与健康发展。

2) 未有成熟的产品技术标准对预制型无机石材进行技术把控，易造成“劣币驱逐良币”的不良情形。同时，产品性能指标偏低容易导致工程质量问题层出。

3) 预制型无机石材的施工应用技术及后续维护和保养技术不够全面，导致施工不规范、验收标准不统一、质量鉴定依据不足等问题。

基金项目

广州市建筑集团有限公司科技计划项目(2022-KJ00); 广东省住建厅科技创新项目(2022-K25-534807)。

参考文献

- [1] Khedr, M.S.A., Ali, M.F., *et al.* (2020) Archaeometric Study of the Historic Terrazzo Pavement of Prince Mohamed Ali Museum, Cairo, Egypt. *Pollack Periodica*, **15**, 221-232. <https://doi.org/10.1556/606.2020.15.1.21>
- [2] 赵宝军, 吴琛, 曾正祥, 等. 新型无机电造石的制备及常见问题解决措施[J]. *新型建筑材料*, 2021, 48(9): 146-148+155.
- [3] Ogrigbo, O.R. and Black, L. (2016) Influence of Slag Composition and Temperature on the Hydration and Microstructure of Slag Blended Cement. *Construction and Building Materials*, **126**, 496-507. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.057>
- [4] Duraman, S.B. and Richardson, I.G. (2020) Microstructure & Properties of Steel-Reinforced Concrete Incorporating Portland Cement and Ground Granulated Blast Furnace Slag Hydrated at 20°C. *Cement and Concrete Research*, **137**, Article ID: 106193. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106193>
- [5] Detwiler, R.J., Fapohunda, C.A. and Natale, J. (1994) Use of Supplementary Cementing Materials to Increase the Resistance to Chloride ion Penetration of Concrete Cured at Elevated Temperatures. *ACI Materials Journal*, **91**, 63-66. <https://doi.org/10.14359/4451>
- [6] 陈拴发, 周维科. 掺矿粉水泥的水化机理[J]. *西安建筑科技大学学报*, 2000, 32(6): 166-169.
- [7] 杨荣俊, 隗功辉, 张春林, 等. 掺矿粉混凝土耐久性研究[J]. *混凝土*, 2004(11): 38-41.
- [8] 曹巍. 矿粉的胶凝活性及其对混凝土氯离子渗透性的影响[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2016.
- [9] 锡振东. 掺矿渣微粉的高性能混凝土耐久性试验及其力学性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.
- [10] 郭丽萍, 雷东移, 陈波, 吴槭. 硅粉表面改性及其分散效果评价[J]. *表面技术*, 2018, 47(7): 146-151.
- [11] Adil, G., Kevern, J.T. and Mann, D. (2020) Influence of Silica Fume on Mechanical and Durability of Pervious Concrete. *Construction & Building Materials*, **247**, Article ID: 148853. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118453>
- [12] Das, S.K. (2020) Fresh, Strength and Microstructure Properties of Geopolymer Concrete Incorporating Lime and Silica Fume as Replacement of Fly Ash. *Journal of Building Engineering*, **32**, Article ID: 101780. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101780>
- [13] Caliskan, S. (2003) Aggregate/Mortar Interface: Influence of Silica Fume at the Micro- and Macro-Level. *Cement and Concrete Composites*, **25**, 557-564. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00095-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00095-1)
- [14] 陈超, 夏扬, 石莹, 连亚明. 微硅粉的微观结构分析[J]. *商品混凝土*, 2016(7): 39-42.
- [15] 李瑶, 刘润清, 齐雯涵, 等. 硅灰粒径分布对混凝土微观结构及其低温抗压强度的影响[J]. *中国粉体技术*, 2019, 25(6): 75-80.
- [16] 谢祥雄, 王英, 陈健祺. 偏高岭土-粉煤灰基地聚物轻质混凝土试验及性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2023, 50(10): 27-29, 35.
- [17] Tazawa, E. and Miyazawa, S. (1995) Influence of Cement and Admixture on Autogeneous Shrinkage of Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, **25**, 281-287. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00010-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00010-0)
- [18] Abdelmelek, N., Alimrani, N.S. and Krelias, N. (2021) Effect of Elevated Temperatures on Microstructure of High Strength Concrete Based-Metakaolin. *Journal of King Saud University—Engineering Sciences*, **8**, 3639. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.08.001>
- [19] 刘红彬, 鞠杨, 彭瑞东, 等. 低水胶比偏高岭土混凝土的强度和细观结构的分形特征[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(8): 1820-1826.
- [20] 李闯, 范颖芳, 李秋超. 基于电化学阻抗谱的偏高岭土水泥性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(8): 755-762.
- [21] Mohammadi, M., Moghtadaei, R.M. and Samani, N.A. (2014) Influence of Silica Fume and Metakaolin with Two Different Types of Interfacial Adhesives on the Bond Strength of Repaired Concrete. *Construction and Building Materials*, **51**, 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.048>
- [22] Lemonis, N., Tsakiridis, P.E., Katsiotis, N.S., *et al.* (2015) Hydration Study of Ternary Blended Cements Containing Ferronickel Slag and Natural Pozzolan. *Construction and Building Materials*, **81**, 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.046>

-
- [23] 贾艳涛. 矿渣和粉煤灰水泥基材料的水化机理研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2005.
- [24] 郑玉飞. 低水胶比复合胶凝材料的水化程度及孔结构研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [25] 王秀娟, 陆文雄, 邵霞, 等. 高炉矿渣用作高性能混凝土掺合料的研究进展[J]. 上海大学学报, 2004, 10(2): 170-175.
- [26] Skalny, I. (1991) Relationships between Microstructure and CRCP and Shrinkage of Cement Paste. In: *Materials Science of Concrete II*, The American Ceramic Society, Columbus, 111-147.
- [27] 喻乐华, 欧辉. 量化分析珍珠岩粉在水泥基材料中的火山灰效应[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(6): 739-742.
- [28] 熊春杨, 何鑫, 范晓玲, 等. 无机人造石材的制备研究[J]. 江西建材, 2022(9): 56-58.
- [29] Szostak, B. and Golewski, G.L. (2021) Rheology of Cement Pastes with Siliceous Fly Ash and the CSH Nano-Admixture. *Materials*, **14**, Article No. 3640. <https://doi.org/10.3390/ma14133640>
- [30] Papayianni, I., Stefanidou, M. and Pacht, V. (2015) Survey of Repaired and Artificial Stones of the Archaeological Site of Pella Five Years after Application. Springer International Publishing, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08533-3_37
- [31] 范晓玲, 熊春杨, 何鑫, 等. 高性能水泥基人造石材的性能优化研究[J]. 石材, 2022(12): 9-11.
- [32] 伍政华, 贺拾, 叶明, 等. 高性能无机人造石真空挤出成型工艺[J]. 石材, 2021(2): 7-11.
- [33] 张国明, 李犇, 郑致远. 改性无机人造石材的力学性能研究[J]. 佛山陶瓷, 2021, 31(6): 16-20.
- [34] 王振波, 张君, 罗孙一鸣. 喷水法成型纤维网增强水泥基板材抗弯性能[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(5): 551-555.