

文章编号:1673-9981(2021)03-0243-07

# 纳米改性地聚物材料影响混凝土性能应用研究

韩文静<sup>1</sup>,宋进朝<sup>2</sup>,陶勇<sup>3</sup>

1.永城职业学院 机电工程系,河南 永城 476600;2.永城职业学院 建筑工程系,河南 永城 476600;3.中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州 221008



**摘要:**地聚物由于自身的热稳定性、耐化学腐蚀性和环境友好的优点,在建筑材料领域中得到了越来越多的应用.通过介绍地聚物材料进行纳米改性的必要性,阐述了纳米材料改善混凝土性能的研究进展,以及纳米改性地聚物材料影响混凝土性能的研究进展.

**关键词:**纳米改性;地聚物;混凝土;性能;研究

**中图分类号:**TU503

**文献标识码:**A

**引文格式:**韩文静,宋进朝,陶勇. 纳米改性地聚物材料影响混凝土性能应用研究[J]. 材料研究与应用,2021,15(3):243-249.  
HAN Wenjing, SONG Jinchao, TAO Yong. Research progress in influence of nano modified geopolymers on concrete performance[J]. Materials Research and Application,2021,15(3):243-249.

由于工业的快速发展,对环境造成了极大的影响,成为可持续发展需要重点考虑的问题.对环境产生不利影响的行业主要是水泥、印染业、塑料业、火力发电等,在这些行业中水泥制造业的环境污染水平不断上升.开发替代粘合剂以取代传统硅酸盐水泥成为建筑领域影响可持续发展的关键因素之一,世界各地的许多研究机构都在关注如何利用工业废料作为砂浆和混凝土中水泥的替代品,最有前景的替代方案是基于地聚物的建筑材料<sup>[1]</sup>.地聚物的术语由法国J. Davidovits在1978年提出<sup>[2]</sup>.地聚物主要原料是含有活性硅、铝组分的矿物或工业废弃物,是高碱环境下制备的新型无机胶凝材料,具有独特的三维网络状结构.

地聚物是近几十年来迅速发展起来的新材料,其基于硅酸盐和/或铝硅酸盐低聚物的聚合,促进了三维聚合物骨架的发展,未溶解的固体颗粒被粘合在一起,整个体系硬化成最终的耐用结构.地聚物材

料主要由原材料和碱性催化剂两部分组成.粉煤灰、赤泥、铜渣、稻壳灰等废弃物可以有效地用作原料,钠基或钾基碱性溶液通常用作地聚物中的碱性催化剂.聚合过程通过碱性溶液激活废料中的氧化铝和二氧化硅,形成三维非晶态聚合链<sup>[3]</sup>.由此制备的混凝土具有与硅酸盐水泥相同的外观和力学性能.许多学者研究了将粉煤灰用作地聚物砂浆和混凝土生产的原料的可行性.由于粉煤灰富含氧化铝( $Al_2O_3$ )和氧化硅( $SiO_2$ ),因此它可以与碱性活化溶液结合,以生产新的地聚物粘合剂<sup>[4]</sup>.地聚物具有甚至比传统硅酸盐水泥基材料更为优异的力学性能、热稳定性、耐化学腐蚀性和环境友好性等特性,在建筑材料领域中具有广阔的应用前景.然而由于地聚物具有抗碳化性能差、干缩性大等缺点,从而限制了其在建筑工程中的应用<sup>[5]</sup>.

在混凝土中使用纳米材料,在混凝土技术中是具有创新的革命步骤<sup>[6]</sup>.纳米材料又称超细微粒,是

收稿日期:2021-01-20

基金项目:河南省高等学校青年骨干教师培养项目(2017GGJS295)

作者简介:韩文静(1985-),女,硕士研究生,副教授,主要进行材料科学与工程、安全工程相关的研究工作,

Email:hanwenjing19850122@126.com

指尺度为 1~100 nm 的颗粒. 它具有小尺寸效应、量子效应、表面效应等, 不同于宏观物体结构的特殊性质. 随着纳米技术的发展和在水泥混凝土水硬化性能的研究发现, 适量的纳米颗粒可以加速火山灰反应、降低材料的孔隙率、促进水化及改善界面过渡区. 为提高水泥基材料的力学性能和耐久性, 纳米  $\text{CaCO}_3$ 、纳米  $\text{TiO}_2$ 、纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  等得到了广泛应用<sup>[7]</sup>. 纳米材料在改善混凝土的力学性能方面具有巨大的潜力, 作为填料, 它们可以降低渗透性. 在地聚物砂浆和混凝土中, 将多种纳米材料组合在一起, 以改善其力学性能和微观结构性能<sup>[8]</sup>.

## 1 纳米材料对混凝土性能影响的研究情况

在对混凝土水化及工作性能影响方面. A. Nazari 等人<sup>[9]</sup>用纳米  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等量取代水泥 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% 和 2.0% 并研究了对混凝土工作性能的影响. 研究发现, 随着纳米  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  取代量的增加, 混凝土和易性减低, 当纳米  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量达到 2.0% 时可生产出强度较高的混凝土.

在对混凝土力学性能影响方面. A. Nazari 等人<sup>[10]</sup>研究了不同掺量下纳米  $\text{TiO}_2$  对混凝土的影响, 当  $\text{TiO}_2$  掺量为 2.0% 时混凝土的劈拉强度最高, 掺量为 1.0% 时抗折强度最高,  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒含量超过 3% 时会导致抗弯强度降低. 将平均粒径为 15 nm 的  $\text{TiO}_2$  纳米粒子加入到混凝土中, 提高了混凝土的抗弯强度<sup>[11]</sup>. 纳米  $\text{TiO}_2$  的加入可缩短混凝土的初终凝时间, 改善混凝土的孔结构并使分布的孔隙向无害及危害小的方向发展. M. Jalal<sup>[12]</sup>研究了含纳米  $\text{TiO}_2$  和工业废渣粉煤灰(FA)的高强自密实混凝土(HSSCC)的强度增强、耐久性、流变、热学和微观结构性能. 硅酸盐水泥可被高达 15% 的废灰和高达 5% 的  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒取代,  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒作为水泥的部分替代物, 在水化早期由于结晶  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含量的增加, 可加速 C—S—H 凝胶的形成, 从而改善混凝土的微观结构和耐久性.

在对混凝土耐久性影响方面. A. H. Shekari 等人<sup>[13]</sup>研究了混凝土中加入纳米  $\text{ZrO}_2$ 、纳米  $\text{TiO}_2$ 、纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  和纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  对耐久性(抗氯离子侵蚀及抗渗性)的影响. 结果表明, 纳米材料的加入能改善混凝土的耐久性, 其中纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的掺入对混凝土

的耐久性的改善效果最好. B. Wang 等人<sup>[14]</sup>分别在强度等级为 C60, C70 和 C80 的混凝土试块中掺入 80%, 6% 和 5% 的纳米  $\text{SiO}_2$ , 经过 300 次冻融循环后质量损失仅减少 1%, 0.6% 和 0.30%, 表明纳米  $\text{SiO}_2$  能提高混凝土的抗冻性. 用纳米  $\text{SiO}_2$  制备的 CSH 凝胶, 其微观形态和形貌比参比试件中的产品更均匀、致密、有序, 试样与纳米  $\text{SiO}_2$  的界面更致密、空隙更小. 与纳米  $\text{SiO}_2$  复合的氢氧化钙晶体尺寸较大无序排列, 方向性减弱, 晶粒尺寸变小. 采用添加 1% 和 3% 的纳米  $\text{SiO}_2$  (NS)、纳米  $\text{TiO}_2$  (NT) 和纳米  $\text{ZrO}_2$  (NZ) 来提高混凝土的耐磨性和抗氯离子渗透性, 结果表明 NS/NT/NZ 的加入可以改变混凝土的微观结构, 从而显著提高混凝土的耐磨性和抗氯离子渗透性<sup>[15]</sup>. R. B. Ardalan<sup>[16]</sup>采用纳米硅喷涂技术和水稀释纳米氧化硅处理技术, 研究了纳米  $\text{SiO}_2$  颗粒对混凝土渗透性的影响. 表明无论是在胶体溶液中固化的混合物, 还是喷涂纳米二氧化硅的混合物, 它们的抗压强度和抗水渗透性都有显著提高. 这是由于纳米颗粒参与完成水化过程, 进而导致其渗透性降低, 形成保护层, 从而提高大块混凝土面板的耐久性.

在对混凝土微结构影响方面. Li H. 等人<sup>[17]</sup>研究结果表明, 纳米  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  填充了孔隙, 减少了水合物中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  化合物的含量, 掺入纳米  $\text{SiO}_2$  可使混凝土基体更加均匀致密. B. W. Jo 等人<sup>[18]</sup>研究表明, 纳米  $\text{SiO}_2$  的掺入可填充砂浆孔隙且促进火山灰反应的进行. 同时, 还研究了纳米  $\text{SiO}_2$  颗粒水泥砂浆的性能. 结果表明, 含 NS 的砂浆综合强度均高于含硅灰的砂浆, 表明纳米  $\text{SiO}_2$  起到了填充改善微观结构的作用, 同时也起到了促进火山灰反应的作用. F. Sajedi 等人<sup>[19]</sup>研究了纳米粘土对普通硅酸盐砂浆微观结构的影响. 结果表明, 纳米粘土不仅能填充孔隙, 而且能促进水化反应. 纳米颗粒在硅酸盐水泥中的作用主要包括晶核效应、火山灰反应及颗粒填充效应, 即促进水泥水化的进行, 增加 C—S—H 凝胶的数量并且增加 C—S—H 凝胶自身力学性能, 降低基体孔隙率.

## 2 纳米改性地聚物材料对混凝土性能的影响

### 2.1 纳米粒子改性矿渣基地聚物

杨凌艳<sup>[20]</sup>研究发现: 矿渣基地聚物, 能聚合生

成类似于水泥水化产物的 C—(A)—S—H 凝胶;金红石型纳米 TiO<sub>2</sub> 的掺入可增强矿渣基地聚物的力学性能,28 天抗压强度与抗折强度分别比没有掺入纳米 TiO<sub>2</sub> 的增加了 9.4% 和 15.1%;纳米 SiO<sub>2</sub> 及锐钛矿型纳米 TiO<sub>2</sub> 两组的收缩率相近且高于基准值,而金红石型纳米 TiO<sub>2</sub> 的掺入则干燥收缩率降低 21.1%;金红石型纳米 TiO<sub>2</sub> 的掺入,使 28 天总孔隙率降低至基准组的 69.5%、介孔含量降低至 59.6%。

锐钛矿型纳米 TiO<sub>2</sub> (TiO<sub>2</sub>(A)) 的掺入使碱激发矿渣浆体 (AASP) 中介孔含量增加、干燥收缩增大<sup>[21]</sup>,但收缩应力未超过基体自身抗拉强度,故产生自身微裂缝较少且随着龄期的增长水化不断填充孔隙,致使浆体随着龄期的增加抗折强度不降低反而增加,如图 1 所示<sup>[20]</sup>。根据纳米材料对 AASP 力学性能及干燥收缩性能影响结果可知,金红石型纳米 TiO<sub>2</sub> (TiO<sub>2</sub>(R)) 对 AASP 性能优化效果较好,即提高 AASP 力学性能及降低干燥收缩值。

Gao K. 等人<sup>[22]</sup>在激发剂中掺入纳米 SiO<sub>2</sub>,使其与 Na<sub>2</sub>O 的质量比为 1.5,所制备的偏高岭土地聚物抗压强度最高、结构更致密,抗渗透性能的提高能提升地聚物耐久性能。Behfarnia K. 等人<sup>[23]</sup>研究纳米硅和微晶硅单独情况下及同时施用,对碱激发矿渣混凝土透气性的影响。研究发现:用纳米 SiO<sub>2</sub> 替代 5% 的矿渣,坍落度降低了 82%;添加 10% 硅粉,28 天和 90 天抗压强度分别提高 24% 和 28%;

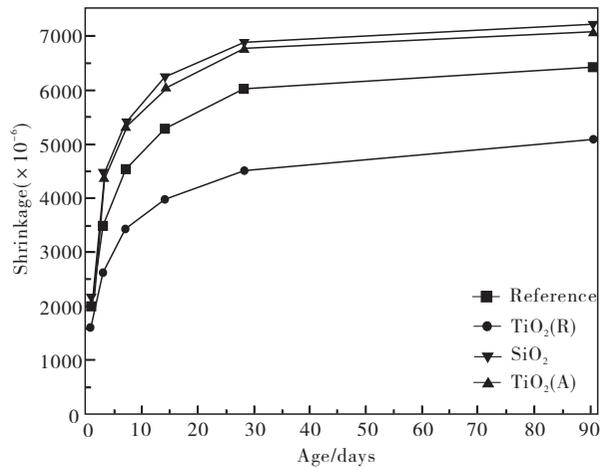


图 1 纳米材料对 AASP 干燥收缩影响 (20±3 °C, 5±5%)  
Fig. 1 Effect of nano materials on drying shrinkage of AASP (20±3°C, 5±5%)

在含有 3% 纳米硅的样品中观察到纳米 SiO<sub>2</sub> 对 28 天和 90 天抗压强度的最大影响分别为 12% 和 11%。纳米 SiO<sub>2</sub> 会导致实测抗氯离子渗透性能降低,在 14 天和 28 天的试验循环后,使用 10% 的硅粉代替炉渣,碳化深度分别降低了 29% 和 34%。这是由于用纳米 SiO<sub>2</sub> 代替矿渣,使碱激发矿渣混凝土而生成了层状结构的物相,其对渗透性产生了严重的不良影响。纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒与微粉一样,填充了碱矿渣混凝土基体中的孔隙,从而提高了矿渣基地聚物的密实度(图 2)。



图 2 矿渣基地聚物微观形貌图片

(a) 和 (b) 含 0% 纳米硅粉; (c) 含 10% 纳米硅粉

Fig. 2 Micrograph of slag based polymer

(a) and (b) containing 0% nano silica powder; (c) containing 10% nano silica powder

## 2.2 纳米粒子改性粉煤灰基地聚物

粉煤灰基聚合物作为一种新型高性能绿色胶凝材料,具有优良的耐蚀性。但在常温条件下,粉煤灰原料中的硅、铝相溶解较少,导致地聚物中硅铝键聚合度较低,早期强度不高。Revathi T. 等人<sup>[24]</sup>将不

同剂量的纳米 SiO<sub>2</sub> (0~3%) 在 80% 的 FA (粉煤灰) 和 20% 的 GGBS (磨细矿粉) 中的形成进行了实验研究。结果发现:纳米 SiO<sub>2</sub> 可触发成核,在 12~72 h 的早期,形成更多的地聚物凝胶,这从而缩短了诱导期;当纳米 SiO<sub>2</sub> 的量为 2.5%, 随着固化时间的增

加,从1d到3d的强度增加50%。同时,研究了30~800℃温度范围内热处理后砂浆的重量变化和强度特性,发现掺入纳米SiO<sub>2</sub>砂浆没有出现任何可见的裂缝/劣化。

纳米SiO<sub>2</sub>在地聚合物中的应用可以改善致密性、均匀性及强度<sup>[7]</sup>,以及纳米SiO<sub>2</sub>在环境固化条件下可提高压缩、弯曲和拉伸强度。图3为CFA-MSWI复合地聚合物的微观形貌图<sup>[25]</sup>。从图3可知,掺加纳米SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>后,地聚合反应更加完全及体系结构更为致密,其中纳米改性地聚合物中的纳米SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的掺量分别为1.5%和2.0%,试样记作Y-0,Y-1.5%S和Y-2.0%A。郭晓潞<sup>[25]</sup>认

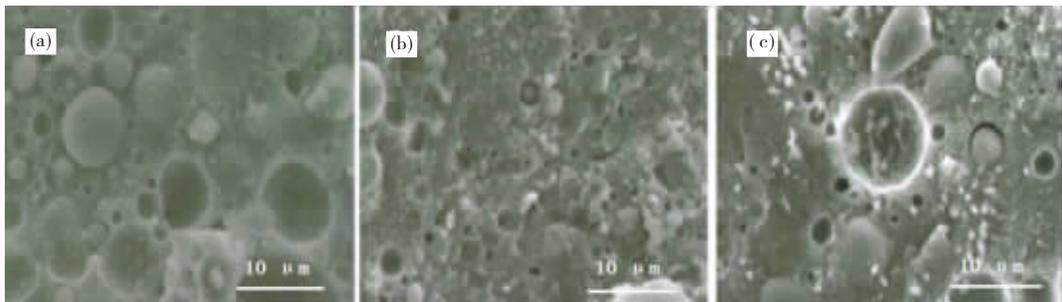


图3 CFA-MSWI复合地聚合物的SEM图

(a)Y-0;(b)Y-1.5%S;(c)Y-2.0%A

Fig. 3 Microscopic morphologies o of CFA-MSWI composite geopolymer

Deb P. S. 等人<sup>[27]</sup>在粉煤灰单掺或粉煤灰掺量为15%或10%的矿物聚合物砂浆中加入纳米SiO<sub>2</sub>后发现:可降低砂浆的孔隙率,提高砂浆的微观结构致密度;纳米SiO<sub>2</sub>对20℃养护的粉煤灰地聚合物砂浆的流动性、强度、吸附性能和耐酸性能有影响,纳米SiO<sub>2</sub>降低了吸附性能、增加了混合物的抗压强度;添加2%的纳米SiO<sub>2</sub>后,酸溶液浸泡90天后混合物的平均质量损失从开始的6.0%降低到1.9%,表明纳米SiO<sub>2</sub>在酸性溶液中浸泡后强度损失明显降低。

Adak D. 等人<sup>[28]</sup>对低钙粉煤灰地聚合物砂浆进行了试验研究,采用粉煤灰不同掺量(0%,4%,6%,8%和10%)的激发剂液配制低钙粉煤灰地聚合物砂浆。当加入6%纳米SiO<sub>2</sub>的地聚合物砂浆,在常温养护下28天后,其抗压、抗折及抗拉强度均有明显提高。在粉煤灰掺量为4%的条件下,由于纳米偏高岭土的均匀分散,形成了地聚合物反应的成核材料,使复合材料的抗压强度显著提高,这种地聚合物反应导致结构更加紧凑。

为,掺入地聚合物的纳米颗粒在晶核和颗粒填充方面与水泥具有相同的作用,纳米SiO<sub>2</sub>和纳米Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在地聚合物中起到填料的补强作用,从而降低了地聚合物基体的孔隙率。同时,以废弃粘土砖粉(WBP)和高钙粉煤灰(CFA)粉煤灰为原料,以纳米SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为改性剂,制备了纳米粒子改性复合地聚物。结果表明,纳米SiO<sub>2</sub>对地聚物的改性效果优于纳米Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,2%(质量分数)的纳米SiO<sub>2</sub>和1%的纳米Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的抗渗性及抗冻性均优良。冻融试验表明<sup>[26]</sup>,地聚物的显气孔率和真气孔率有所提高,其中小于50nm的无害孔洞和少量孔洞减少,大于50nm有害孔洞和多害的孔洞增加。

Khater H. M. 和 Riahi S. 等人<sup>[29-30]</sup>发现,原材料中的细小颗粒关系到粉煤灰基聚合物的抗压强度。在聚合过程中,纳米颗粒不仅起填充作用,而且可以提高硅铝相在碱性环境中的溶解速率,从而改善聚合物的力学性能。研究了化学合成纳米SiO<sub>2</sub>与纳米Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>天然纳米材料(硅灰、稻壳灰)对粉煤灰基聚合物的影响。在粉煤灰基聚合物体系中添加3%(质量分数)的化学合成纳米材料后,随着纳米SiO<sub>2</sub>用量的增加系统的凝固时间明显缩短,化学合成纳米材料能显著改善地聚合物的早期抗压强度,但纳米Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对地聚合物中凝胶相的结构没有影响。这是由于SiO<sub>2</sub>可以改善无定形凝胶相的聚合度,纳米材料在聚合物中起化学作用,可以提高地聚合物的耐久性。

### 3 纳米改性地聚合物材料的机理

纳米粒子对活性粉末混凝土RPC的耐磨性和抗氯离子渗透性的影响主要是由于其成核作用,纳

米粒子增强水泥基材料机理如图 4 所示<sup>[15]</sup>。从图 4 可见,纳米粒子可以促进水泥水化,减小氢氧化钙中 C—H 键的尺寸和 C—H 键的取向,使微观结构致密化,从而改善界面区。在对地聚物影响方面,纳米粒子也会起到晶种成核作用,优化孔隙结构,提高地聚物的致密性。硅铝质纳米粒子可参与聚合反应,促

使产物结构更为致密,但过量的纳米粒子会对地聚物的力学性能和耐久性能产生不良的影响。这是因为纳米粒子比表面积大,大掺量下需要更多的拌合水,这容易导致拌合不均匀或者在硬化后生成较多的孔隙。同时,过多未反应的纳米颗粒在填充孔隙中容易聚集,形成“缺陷”,降低地聚物的耐久性能。

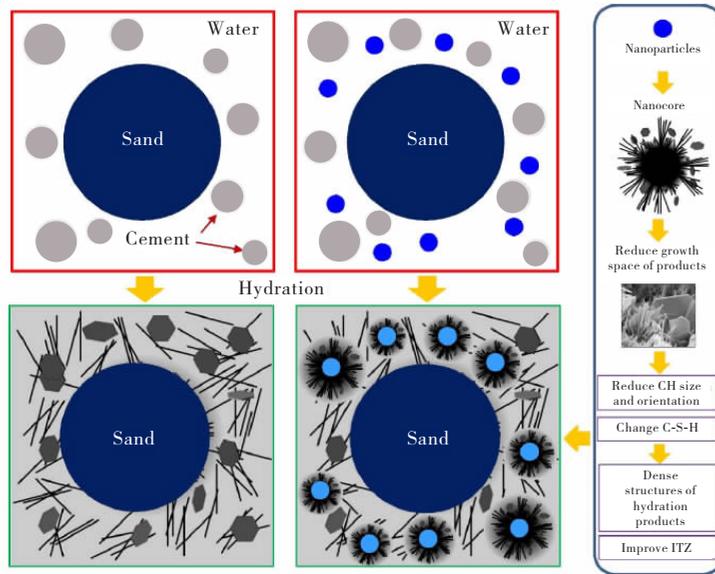


图 4 纳米粒子增强水泥基材料机理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mechanism of nano particle reinforced cement-based materials

地聚物胶凝材料在反应机理方面与硅酸盐水泥的水化机理存在着差异性,目前主要在粉煤灰基地聚物和矿渣基地聚物中掺入纳米粒子来改善地聚物性能。在地聚合物胶凝材料中加入一定量的纳米粒子,一方面可以促进聚合,使产物结构更加致密;另一方面,未反应的纳米粒子可以填充地聚合物胶凝材料孔隙,降低孔隙率,提高抗碳化和抗氯离子渗透性。纳米粒子掺入地聚物中主要起到化学作用、晶种成核和颗粒填充作用,未反应的纳米粒子由于颗粒尺寸极小可以填充在孔隙中而降低孔隙率,从而提升地聚物胶凝材料的抗碳化性能及抗氯离子渗透性能。

## 4 结 语

纳米改性对地聚物材料形成有很大的影响,对提高混凝土的整体性能也是十分必要的,其影响混凝土性能研究方面的还有很大的空间。目前,纳米改性地聚物改性机理的研究还需要针对不同的条件进

行探索总结,在实际应用中要注意原材料的种类、硅铝的质量比,并确定适当的纳米粒子数量。还需要根据改性制备条件,进行有针对性的研究工作,进而推动纳米改性地聚物在建筑材料领域的可持续发展。

## 参考文献:

- [1] TANAKORN P, PRINYA C. The effect of adding nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature[J]. *Materials & Design*, 2014, 55: 58-65.
- [2] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric materials[J]. *J Davidovits*, 2005, 35(2): 429-441.
- [3] DUAN P, YAN C J, ZHOU W. Compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer blended with silica fume under thermal cycle[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 78: 108-119.
- [4] ASHLEY R K, YOO J K, HU J, et al. Characterization and early age physical properties of ambient cured geopolymer mortar based on class C fly ash [J].

- International Journal of Concrete Structures and Materials, 2015, 9(1): 35-43.
- [5] MANDEEP K, JASPAL S, MANPREET K. Microstructure and strength development of fly ash-based geopolymer mortar: Role of nano-metakaolin[J]. Construction and Building Materials, 2018, 190: 672-679.
- [6] SAI DINAKAR SWAROOP M, PRINCE ARUL RAJ G. Experiment on concrete containing with activated carbon and nano-fly ash, nano metakaolin [J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2019, 6(8): 1030-1033.
- [7] 郭晓璐, 施惠生, 夏明. 不同纳米材料对粉煤灰基地聚合物的改性作用 [J]. 功能材料, 2016, 47(11): 11001-11006.
- [8] 王爱国, 郑毅, 张祖华, 等. 地聚物胶凝材料改性提高混凝土耐久性的研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33(15): 2552-2560.
- [9] NAZARI A, RIAHI S, RIAHI S, et al. Benefits of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nanoparticles in concrete mixing matrix [J]. Journal of American Science, 2010, 6(4): 102-106.
- [10] NAZARI A, RIAHI S, SEYEDEH F S, et al. Improvement the mechanical properties of the cementitious composite by using  $\text{TiO}_2$  nanoparticles [J]. Journal of American Science, 2010, 6(4): 98-101.
- [11] NAZARI A, RIAHI S. The effects of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles on physical, thermal and mechanical properties of concrete using ground granulated blast furnace slag as binder [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(4-5): 2085-2092.
- [12] JALAL M, FATHI M, FARZAD M. Effects of fly ash and  $\text{TiO}_2$  nanoparticles on theological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self compacting concrete [J]. Mechanics of Materials, 2013, 61: 11-27.
- [13] SHEKARI A H, RAZZAGHIL M S. Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete [J]. Prvcedia Engineering, 2011, 14: 3036-3041.
- [14] WANG B, WANG L, LAI F C. Freezing resistance of HPC with nano- $\text{SiO}_2$  [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Maters Science Edition, 2008, 23(1): 85-88.
- [15] WANG D, ZHANG WEI, RUAN Y F, et al. Enhancements and mechanisms of nano particles on wear resistance and chloride penetration resistance of reactive powder concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 189: 487-497.
- [16] ARDALAN R B, JAMSHIDI N, ARABAMERI H, et al. Enhancing the permeability and abrasion resistance of concrete using colloidal nano- $\text{SiO}_2$  oxide and spraying nanosilicon practices [J]. Construction and Building Materials, 2017, 146: 128-135.
- [17] LI H, XIAO H G, YUAN J, et al. Microstructure of cement mortar with nano-particles [J]. Composites Part B: Engineering, 2004, 35(2): 185-189.
- [18] JOB W, KIM C H, LIM J H. Characteristics of cement mortar with nano- $\text{SiO}_2$  particles [J]. Materials Journal, 2007, 104(4): 1351-1355.
- [19] SAJEDI F, RAZAK H A. Effects of thermal and mechanical activation methods on compressive strength of ordinary Portland cement-slag mortar [J]. Materials & Design, 2011, 32(2): 984-995.
- [20] 杨凌艳. 碱激发矿渣微结构优化及性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [21] COLLINS F, SANJAYAN J G. Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(9): 1401-1406.
- [22] GAO K, LIN K L, WANG D Y, et al. Effects  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  molar ratio on mechanical properties and the microstructure of nano- $\text{SiO}_2$  metakaolin-based geopolymers [J]. Construction and Building Materials, 2014, 53: 503-510.
- [23] BEHFARNIA K, ROSTAMI M. Effects of micro and nanoparticles of  $\text{SiO}_2$  on the permeability of alkali activated slag concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 131: 205-213.
- [24] REVATHI T, JEYALAKSHMI R, RAJAMANE N P. Study on the role of  $n\text{-SiO}_2$  incorporation in thermo-mechanical and microstructural properties of ambient cured FA-GGBS geopolymer matrix [J]. Applied Surface Science, 2018, 449: 322-331.
- [25] 郭晓璐, 施惠生, 董文靖. 纳米改性 CFA-MSWI 复合地聚合物的耐久性 [J]. 水泥技术, 2014(2): 30-34.
- [26] 郭晓璐, 施惠生. 纳米改性 WBP-CFA 地聚合物的耐久性和孔结构 [J]. 材料研究学报, 2017, 31(2): 110-116.
- [27] DEB P S, SARKER P K, BARBHUIYA S. Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 72: 235-245.
- [28] ADAK D, SARKAR M, MANDAL S. Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar [J]. Construction and Building

Materials,2014,70: 453-459.

[29] KHATER H M, EL-SABBAGH B A, FANNY M, et al. Effect of nano-clay on alkali activated water-cooled slag geopolymer[J]. British Journal of Applied Science & Technology,2013,3(4):774-776.

[30] RIAHI S, NAZARI A. The effects of nanoparticles on early age compressive strength of ash-based geopolymers[J]. Ceramics International,2012,38(6): 4467-4476.

## Research progress in influence of nano modified geopolymer on concrete performance

HAN Wenjing<sup>1</sup>, SONG Jinchao<sup>2</sup>, TAO Yong<sup>3</sup>

1. *Department of Architectural Engineering, Yongcheng Vocational College, Yongcheng 476600, China;*

2. *Department of Mechanical and Electrical Engineering, Yongcheng Vocational College, Yongcheng 476600, China;*

3. *School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China*

**Abstract:** Due to the advantages of thermal stability, chemical corrosion resistance and environmental friendliness, Geopolymers been widely used in building materials. This paper mainly introduces the necessity of nano modified Geopolymer Materials, and expounds the research progress of nano materials to improve the performance of concrete. The research progress of nano modified Geopolymer Materials on the performance of concrete is reviewed.

**Key words:** nano modification; geopolymer; concrete; performance; research