

# 纳米材料应用在现代混凝土基础设施中的优势和挑战

耶稣包蒂斯塔-古铁雷斯, 安东尼奥·萨莫拉-卡斯特罗, 卡拉·埃雷拉-梅,  
塞尔吉奥·奥诺拉托-莫雷诺, 奥古斯丁·圣玛丽亚-洛佩兹  
隶属机构: 墨西哥微纳米技术研究中心

**摘要:** 现代混凝土基础设施需要具有更高机械强度和更高耐久性的结构部件。一种解决方案是在水泥基材料中添加纳米材料, 这可以增强其机械性能。这样的纳米材料包括纳米二氧化硅 (nano-SiO<sub>2</sub>)、纳米氧化铝 (nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、纳米氧化铁 (nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、纳米二氧化钛 (nano-TiO<sub>2</sub>)、碳纳米管 (CNT)、石墨烯和氧化石墨烯。这些纳米材料可以与钢纤维、玻璃、稻壳粉和粉煤灰等其他增强材料一起添加到水泥中。这些材料的最佳用量可以提高水泥基材料的抗压、抗拉和抗弯强度, 以及它们的吸水性和可加工性。这些纳米材料的使用可以提高混凝土基础设施的性能和生命周期。本综述介绍了最近关于纳米材料的掺入对水泥基复合材料性能的主要影响的研究。纳米材料可以降低水泥孔隙率, 产生更致密的界面过渡区。此外, 纳米材料增强水泥可以建造具有更高耐久性的高强度混凝土结构, 这将减少维护要求或提前更换。此外, 在水泥基体中加入纳米二氧化钛和碳纳米管可以为混凝土结构提供自清洁和自感应能力。这些优势有助于污染物的光催化分解和混凝土结构的健康监测。纳米材料在基于高强度混凝土结构的智能基础设施中具有巨大的应用潜力。

**关键词:** 碳纳米管; 水泥基材料; 混凝土基础设施; 机械强度; 纳米材料

## The Advantages and Challenges of Nanomaterials Applications in Modern Concrete Infrastructure

Jesus Bautista-Gutierrez, Antonio Zamora-Castro, Karla Herrera-May,  
Sergio Honorato-Moreno, Agustin Santamaria-Lopez  
Affiliation: Micro and Nanotechnology Research Centre, Mexico

**Abstract:** Modern concrete infrastructure requires structural components with higher mechanical strength and greater durability. A solution is the addition of nanomaterials to cement-based materials, which can enhance their mechanical properties. Some such nanomaterials include nano-silica (nano-SiO<sub>2</sub>), nano-alumina (nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), nano-ferric oxide (nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), nano-titanium oxide (nano-TiO<sub>2</sub>), carbon nanotubes (CNTs), graphene and graphene oxide. These nanomaterials can be added to cement with other reinforcement materials such as steel fibers, glass, rice hull powder and fly ash. Optimal dosages of these materials can improve the compressive, tensile and flexural strength of cement-based materials, as well as their water absorption and workability. The use of these nanomaterials can enhance the performance and life cycle of concrete infrastructures. This review presents recent research about the main effects on performance of cement-based composites caused by the incorporation of nanomaterials. The nanomaterials could decrease the cement porosity, generating a denser interfacial transition zone. In addition, nanomaterials reinforced cement can allow the construction of high-strength concrete structures with greater durability, which will decrease the maintenance requirements or early replacement. Also, the incorporation of nano-TiO<sub>2</sub> and CNTs in cementitious matrices can provide concrete structures with self-cleaning and self-sensing abilities. These advantages could help in the photocatalytic decomposition of pollutants and structural health monitoring of the concrete structures. The nanomaterials have a great potential for applications in smart infrastructure based on high-strength concrete structures.

**Keywords:** Carbon nanotubes; cement-based materials; concrete infrastructure; mechanical strength; nanomaterials

## 引言:

建筑工程需要能够增强现代混凝土基础设施的水泥基复合材料的机械性能的材料。例如, 需要提高混凝土结构的抗压、抗拉和抗弯强度。为此, 可以将纳米材料与水泥基体混合, 以获得具有高机械强度的混凝土。纳米技术可以促进纳米材料并入水泥基材料的发展, 以提高其机械强度, 减少其对环境的影响。普通波特兰水泥生产过程中产生的 CO<sub>2</sub> 排放量约占该气体世界人为排放量的 5% 至 7%。水泥行业的主要挑战是减少二氧化碳排放。一种替代解决方案是建造具有更高机械强度和更高耐久性的混凝土结构, 这将减少其维护要求或早期更换的需要。因此, 混凝土结构可以有更薄的截面, 这将需要更少的水泥基复合材料来建造它们。

水泥基材料可混入纳米二氧化硅 (nano-SiO<sub>2</sub>)、纳米氧化铝 (nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、纳米氧化铁 (nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、纳米二氧化钛 (nano-TiO<sub>2</sub>)、碳纳米管 (CNT)、石墨烯和氧化石墨烯。近年来, 一些研究人员研究了将纳米材料掺入水泥基材料中。水泥复合材料和纳米材料的混合物可以增加所得混凝土结构的机械强度。因此, 这些结构的生命周期可以延长, 或者它们可能需要更少量的钢筋。用于水泥基复合材料的常见纳米材料是纳米二氧化硅。由于水合硅酸钙 (C-S-H) 的生成和硅酸三钙 (C<sub>3</sub>S) 的溶解, 这种材料加速了水泥水化。此外, 这种水泥水化的加速是由纳米二氧化硅作为 C-S-H 成核的种子引起的。纳米二氧化硅可以提高水泥基材料的耐久性、可加工性和机械性能。另一方面, 纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒可以提高水泥基材料的抗压强度。用量为水泥重量 0.25% 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米纤维可将水泥基材料的抗压强度提高 30%。

另一种可以添加到水泥基体中的纳米材料是纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。这种纳米材料的最佳值提高了混凝土试样的抗压强度。添加二氧化钛纳米粒子的水泥可用于建造具有自清洁和空气净化特性的光催化混凝土。这种混凝土类型可以有效地光催化分解污染物, 包括汽车和工业排放产生的挥发性有机化合物、一氧化碳、氯酚和醛。此外, 石墨烯家族纳米材料可以掺入水泥复合材料中, 以提高其机械强度和耐用性, 并提供自感应能力。含有纳米材料的水泥基材料的其他新特性是它们的低电阻率和自感应能力。例如, 含有 CNT 的水泥基复合材料具有应变传感能力, 可以测量它们在施加负载下的电阻。它代表了获得用于结构健康监测的应变传感混凝土结构系统的优势。

这篇综述包括最近关于水泥基复合材料的机械强度、耐久性和可加工性影响的研究, 这些研究是由于纳米材

料的加入, 如纳米 SiO<sub>2</sub>、纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、纳米 TiO<sub>2</sub>、纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CNT、石墨烯和氧化石墨烯。此外, 还讨论了在水泥基材料中使用纳米材料的主要挑战。

## 水泥基材料中的纳米材料

### 一、纳米二氧化硅 (nano-SiO<sub>2</sub>)

纳米二氧化硅是一种用于土木工程应用的纳米材料, 可以替代微二氧化硅和硅灰。纳米二氧化硅在水泥水化过程中与石灰反应, 生成 C-S-H 凝胶, 可提高混凝土的机械强度和耐久性。纳米二氧化硅在水泥基材料中的良好分散可以加速水泥浆体的水化过程, 从而形成更致密的微观结构。另一方面, 过多的纳米粒子会由于其高表面能而导致团聚, 这将提供不均匀的分散体

Flores-Vivian 等人使用含有纳米二氧化硅的波特兰水泥来改变流变性能并提高耐久性和强度。他们使用的纳米二氧化硅含量为水泥基材料重量的 0.25%。Braz de Abreu 等其他研究人员报告了在巴西型 CP V ARI PLUS 波特兰水泥中使用稳定的纳米二氧化硅颗粒 (尺寸在 3 到 200 nm 之间)。他们制造了三种混凝土混合物: 参考混凝土、添加稳定纳米二氧化硅的混凝土和包含稳定纳米二氧化硅和硅灰的混凝土。之后, 他们研究了养护 3、7 和 28 天的混凝土抗压强度试验结果。与参考混凝土相比, 仅有添加了稳定纳米二氧化硅的混凝土抗压强度在 28 天时分别提高了 27%、20% 和 11%。相反, 与对照混凝土相比, 具有稳定纳米二氧化硅和硅灰的混凝土的抗压强度值甚至更高 (即 28 天时分别为 28%、37% 和 24%)。因此, 纳米二氧化硅和硅灰与波特兰水泥的混合物产生了具有更高抗压强度的混凝土。

Heidari 和 Tavakoli 使用纳米二氧化硅和陶瓷粉末制造了一种混合物。他们根据 ASTM C 618 标准研究了陶瓷粉末的特性, 在混合物中使用了 92% 的材料。在这种混合物中, 水泥被陶瓷粉末 (A 相) 代替。在第二阶段 (阶段 B), 降低陶瓷粉末百分比, 并添加纳米二氧化硅。他们使用粘合剂含量作为常数 (320 kg/m<sup>3</sup>) 和 0.5 的水灰比。在阶段 A 期间, 使用相同比例的骨料和水, 制备具有水泥重量的 0%、10%、15%、20%、25%、30% 和 40% 的陶瓷粉末百分比的混合物。在阶段 B 中, 混合物由 0.5% 和 1% 的纳米二氧化硅和水泥重量的 10%、15%、20% 和 25% 的不同陶瓷粉末含量制成。所有混凝土混合物都是根据 ASTM C192 标准制造的, 并在不同养护龄期 (7、28、56 和 91 天) 下获得了混凝土 (A 阶段) 的抗压强度试验结果。这些结果表明, 混凝土强度随着添加到混凝土中的陶瓷粉末的量成比例地降低。含有 1% 纳米二氧化硅和 10% 陶瓷粉的混凝土试件提高了其抗压

强度。纳米 SiO<sub>2</sub> 对火山灰反应的影响在早期更为有效。

## 二、纳米氧化铁 (nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

在混凝土试件中优化添加纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可以提高其抗压强度。此外,含有纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的水泥砂浆的体积电阻可以通过施加的载荷来改变,从而可以测量压缩应力。它可用于混凝土结构的结构健康监测,无需额外的传感器。

Fang 等人在 7、14 和 28 天时测量了添加不同纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (按水泥重量计 3%、5% 和 10%) 的水泥样品的力学性能。当纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量增加时,表面形貌更致密。对于所有测量结果,与对照砂浆相比,在水泥砂浆中添加纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可提高其抗压强度。使用 10% 的纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量时,水泥样品的抗压强度达到最大值。该纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 用量在养护 7、14 和 28 天时,水泥砂浆的抗压强度分别提高了 66.81%、69.76% 和 25.20%。

Rashad 综述了纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和纳米粘土对水泥复合材料某些性能的影响。这些性能是机械强度、水合热、吸水性、可加工性、凝固时间和耐久性。例如,在水泥基体中加入纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 会降低吸水率和热速率值,并加快峰值时间。此外,当纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量增加时,复合材料的可加工性降低。另一方面,添加到水泥基体中的纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (混凝土中为 0.5% - 5%,砂浆中为 0.5% - 10%) 提高了抗压强度。Nazari 等人还研究了包括纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在内的混凝土的和易性。在这种情况下,水泥部分被纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 替代(即按水泥重量计 0%、0.5%、1%、1.5% 和 2%),并且使用了 0.4 的水与粘合剂比。随着纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 用量的增加,混凝土的和易性降低。此外,Nazari 和 Riahi 开发了两个模型,使用遗传编程和人工神经网络来预测含有纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的混凝土样品的吸水百分比和劈裂抗拉强度。

Khoshakhlagh 等人研究了通过添加不同百分比(按水泥重量计 1% - 5%)的纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和高效减水剂实现的混凝土性能变化。掺入高达 4% 水泥重量的纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可提高混凝土试件的抗弯、抗压和抗拉强度以及透水性。纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量高达 4wt.% 的混凝土试件增加了吸水系数。加入纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的混凝土试件提高了它们的水化热、和易性以及抗压、抗弯和抗拉强度。

## 三、纳米氧化钛 (nano-TiO<sub>2</sub>)

在混凝土试件中添加纳米二氧化钛可以为混凝土提供自洁性能。含有这些纳米粒子的混凝土可以光催化降解来自工业和汽车排放的污染物(例如,VOC、CO、NO<sub>x</sub>、醛和氯酚)。然而,由于碳酸化作用,这种效果随着老化而不太有效。

光催化水泥基涂料在分解气体和有机污染物方面具

有自清洁效果。这是由于混凝土表面上的二氧化钛薄膜可以在阳光中存在的紫外线下提供活性氧。因此,它催化位于纳米二氧化钛涂层混凝土表面的有机物的降解。混凝土表面用雨水清洗,可防止污垢堆积。与其他材料相比,纳米二氧化钛的另一个重要特性是化学稳定性和低廉的价格。此外,纳米二氧化钛可以增强水泥基结构的抗透水性。

Wang 等人研究了在 0、5、10 和 20°C 固化温度下考虑不同含量的纳米二氧化钛的水泥砂浆试样的力学和物理性能。他们使用天然河沙、波特兰水泥(I型普通)和 15 纳米大小的二氧化钛纳米粒子。在实验测试中,纳米二氧化钛的用量分别为水泥重量的 1%、2%、3%、4% 和 5%。在样品的制备过程中,纳米二氧化钛通过超声处理分散在水中。之后,将水泥和沙子混合 1 分钟。然后,加入分散良好的纳米二氧化钛并混合 60 秒,然后加入水。在接下来的阶段,将砂浆配置到模具中并使用不同的温度进行固化。抗压强度特性是根据 ASTM C109 使用液压试验机在 1350 N/s 的受控载荷下确定的。抗弯强度测试根据 ASTM C293 进行评估。该特性是在固化 3、7、28 和 56 天时确定的。随着纳米二氧化钛用量的增加,砂浆试件的水化度提高。二氧化钛纳米粒子可以为水化产物的沉淀提供额外的空间。根据水泥砂浆样品的抗压强度和抗弯强度的响应,在低固化温度下抗压强度和抗弯强度均呈下降趋势。相反,含有纳米二氧化钛的砂浆试样的抗弯和抗压强度相对于普通砂浆有较快的增加,直到纳米二氧化钛含量达到 2 wt.%。对于高于 2 wt.% 的 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒剂量,这种增加会减慢。砂浆样品强度的提高是由促进水泥水化并填充 C-S-H 凝胶孔隙的 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒引起的。这些纳米粒子具有较大的表面积与体积比,允许额外的表面积来沉淀水合产物。此外,TiO<sub>2</sub> 纳米粒子在它们自身和 C-S-H 凝胶之间形成键,从而提高了它们的强度。

Feng 等人研究了掺入纳米二氧化钛的混凝土基体的微观结构以及水泥浆的机械性能。在水灰比为 0.4 的水泥浆中掺入纳米二氧化钛(按水泥重量计 0.1%、0.5%、1.0% 和 1.5%) 在 28 天时分别提高了不同指数的抗弯强度(4.52%、8.00%、8.26% 和 6.71%)。

Jalal 等人研究了含有粉煤灰和纳米二氧化钛的高阻自密实混凝土的特性。他们使用波特兰水泥替代高达 15% 重量的废灰和高达 5% 重量的纳米二氧化钛。在混凝土中添加纳米二氧化钛提高了混凝土的稠度,降低了离析概率。由于纳米二氧化钛,吸水性和毛细作用获得了显着的降低。

#### 四、纳米氧化铝 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的使用可以加速 C-S-H 凝胶的形成过程,特别是在早期,从而提高了复合材料的强度。例如, Muzenski 等人使用含量为 0.25% 的胶凝材料的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米纤维制造了超高强度水泥基材料,从而将抗压强度提高到 200 MPa。与仅使用 1% 硅灰的材料强度相比,这代表了 30% 的增量。这种高抗压强度是通过少量硅灰实现的。这种改进的性能是由于纳米纤维充当种子以产生水合产物并有助于增强 C-S-H 形成,从而减少微裂纹的数量。此外,为了达到水泥基材料的最大机械性能,需要适当分散 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米纤维。较长的分散时间可以减少纤维的团聚,从而提高机械性能。例如, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米纤维分散 3 小时的样品在 28 天龄时的抗压强度达到了更高的值。然而,较高数量的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米纤维和辅助胶凝材料并没有增加水泥基材料的机械性能。

Yang 等人研究了纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对水泥浆样品的氯离子结合能力的影响。这些样品是用 0.5%、1.0%、3.0% 和 5% 的纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 剂量制备的,并使用常规平衡测试检查氯化物结合能力,其中样品分别暴露于 0.05 mol/L、0.1 mol/L、0.3 mol/L、0.5 mol/L 和 1.0 mol/L 的 NaCl 溶液。实验结果表明,加入 5.0% 的纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后,在 NaCl 溶液 (0.05 mol/L) 下结合氯含量增加了 37.2%。因此,适当添加纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可改善水泥浆样品的氯化物结合。

Mohseni 等人研究了纳米氧化铝和稻壳灰 (RHA) 在聚丙烯纤维 (PPF) 增强水泥砂浆中的作用。RHA 是一种农业废料,可回收利用以获得经济和环境效益。分别在 28 天和 90 天添加 3% 纳米氧化铝和 20% RHA,砂浆样品的抗压强度提高了 18% 和 20%;而通过添加 3% 的纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 10% RHA,砂浆样品的抗弯强度分别提高了 34% 和 41%。这种纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的添加在砂浆样品中产生了更致密的微观结构。

#### 五、碳纳米管 (CNT)

最近,一些研究人员报告了碳纳米管对混凝土样品的电气和机械性能的影响。例如,碳纳米管可以减少混凝土中微裂缝的形成和生长。碳纳米管具有重要的机械和电学性能,包括它们的高强度和高导电性。例如,碳纳米管具有高纵横比 (长径比) 的高机械性能,可以产生更强的水泥复合材料。CNTs 水泥基复合材料具有应变传感行为,可以在施加的负载下测量它们的电参数。这种行为可以允许开发混凝土结构的应变传感系统,用于损伤检测和结构健康监测的潜在应用。

García-Macías 等人开发了一种微力学模型来确定掺入 CNT 的水泥基纳米复合材料的压阻行为,并考虑

纳米夹杂物的波纹和不均匀分布。为了验证理论模型,他们测试了掺杂多壁碳纳米管 (MWCNTs) 并暴露于单轴压缩的水泥基样品。这些样品由混凝土、砂浆和复合水泥浆制成。对于多壁碳纳米管增强水泥基复合材料的压缩载荷,他们使用了负载能力为 14 kN 的伺服控制气动万能试验设备。对于水泥浆、砂浆和混凝土样品,它们掺入了电导率在 101 和 104 S/m 之间的 MWCNT。水泥浆、砂浆和混凝土试样使用的填料浓度按水泥重量计分别为 1%、0.75% 和 0.75%。所提出的分析模型可以预测多壁碳纳米管增强水泥基材料在压缩载荷下的电阻性能。

Ruan 等报道了不同类型和剂量的 MWCNTs 对 RPC 在水或热固化下的力学性能的影响。他们制造了 RPC,包括四种类型的 MWCNT,剂量分别为 0%、0.25% 和 0.50%,水/热固化。检查了填充 RFC 样品的 MWCNT 的机械性能。该机械性能考虑了抗弯强度、断裂能、抗压/韧性和抗弯强度与抗压强度的比值。RPC 样品的制造包括多壁碳纳米管、水、减水剂、粉煤灰、石英砂、水泥和硅灰。水泥、硅灰和石英砂的比例为 1:0.25:1.1。此外,20% 的水泥被粉煤灰替代,以增强混合物的流动性并减少水泥用量。所使用的四种 MWCNTs 被分类为 T1 (具有羧基的功能化 MWCNTs)、T2 (具有羟基的功能化 MWCNTs)、T3 (通过催化裂化的螺旋形 MWCNTs) 和 T4 (镀镍的 MWCNTs)。

#### 挑战

纳米技术使纳米材料的制造成为一种可能,这些纳米材料可以掺入水泥基材料中,以产生更高的混凝土结构机械性能。纳米材料对水泥基材料性能的影响包括提高其抗压、抗拉和抗弯强度,降低总孔隙率 (即细化微观结构),加速 C-S-H 凝胶的生成和增加杨氏模量。此外,纳米二氧化钛和碳纳米管等纳米材料的加入可以分别为用水泥基材料获得的产品提供自清洁和自感应性能。为了实现水泥基材料的最佳力学性能,将合适剂量的纳米材料与水泥基材料混合非常重要。例如,过量添加到水泥中的纳米材料会导致水泥基结构的抗压、抗拉和抗弯强度降低。这是由纳米材料在水泥浆中的不均匀分散引起的。因此,纳米材料增强水泥基材料的力学性能取决于纳米材料的用量和种类、分散方式、养护天数和养护方式等因素。在这些因素之间,分散方法可以对纳米材料钢筋混凝土的性能产生显著影响。

纳米材料在建筑行业中的应用面临的一个重要挑战是开发用于纳米材料在水泥样品中分散的有效方法。将纳米材料结合到水泥基材料中的另一种解决方案在于将纳米材料分散在水中,然后再将其结合到水泥基材料的

干组分中。对于这种情况，超声波分散可以作为分散纳米材料的有效方法，尽管这种方法需要电能，从而增加了成本。纳米材料在水泥样品中的不良分散和大量附聚物的形成可能会改变水化过程的动力学，从而改变水泥样品的性能。例如，Singh 等人报道，用于将纳米二氧化硅掺入水泥复合材料中的方法会影响复合材料的孔隙率和机械性能。水泥基材料中不良的纳米二氧化硅分散体可能会产生空隙和薄弱区，从而改变材料的机械性能。表面活性剂如增塑剂和超增塑剂可用于改善纳米材料在水泥基材料中的分散。因此，由于在纳米颗粒周围产生聚集体，表面活性剂可以提高分散的均匀性。由于疏水基团和亲水基团都可以实现这种良好的分散。纳米材料与疏水基团相互作用，亲水基团降低了水的表面张力，增加了纳米材料的分散性。然而，用于分散纳米颗粒的几种表面活性剂（例如聚合物基质）会影响水泥水化动力学。

### 结论

在混凝土中加入纳米材料可以提高其抗压、抗拉和抗弯强度。最近的研究考虑了纳米材料，如纳米二氧化硅、纳米二氧化钛、纳米氧化铁、纳米氧化铝、CNT、石墨烯和 GO。在混凝土中添加这些纳米材料可以获得更致密的微观结构，从而降低吸水率。添加这些纳米材料可以提高混凝土的可加工性。纳米二氧化钛改性混凝土可以为其提供自洁性能和其他好处，帮助环境清洁。此外，添加到混凝土中的纳米二氧化钛可以光催化降解汽车和工业排放物中的污染物（例如氮氧化物、挥发性有机化合物、一氧化碳、氯酚和醛类）。碳纳米管增强水泥基复合材料具有自感知能力，可用于结构健康监测或损伤检测。此外，在水泥基材料中添加石墨烯和 GO 可以提高其机械强度和耐久性，并具有自清洁表面和自感应能力。

在建筑行业，水泥基复合材料的制造会产生大量的二氧化碳气体。为了解决这个问题，一种解决方案是在水泥基复合材料中添加纳米材料，它可以提供具有高机械强度和耐久性的结构部件。因此，可以降低水泥基结构部件的维护要求和更换频率。这些优点可以减少建筑行业中使用的水泥百分比。这反过来又会减少水泥制造过程造成的二氧化碳排放。

纳米技术在水泥基材料中的应用仍处于研究阶段。纳米材料增强水泥试样的实验测试结果表明，它们可以提高所得混凝土的机械强度和耐久性。此外，这些纳米材料可以使新一代智能水泥基复合材料具有应变传感能力，用于损伤检查和结构健康监测。

### 参考文献:

- [1] Sanchez, F.; Zhang, L.; Ince, C. Multi-scale Performance and Durability of Carbon Nanofiber/Cement Composites. In *Nanotechnology in Construction 3*; Bittnar, Z., Bartos, P.J.M., N ě meček, J., Šmilauer, V., Zeman, J., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009.
- [2] Shah, S.P.; Konsta-Gdoutos, M.S.; Metaxa, Z.S.; Mondal, P. Nanoscale Modification of Cementitious Materials. In *Nanotechnology in Construction 3*, Bittnar, Z., Bartos, P.J.M., N ě meček, J., Šmilauer, V., Zeman, J., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009.
- [3] Kang, S.-T.; Seo, J.-Y.; Park, S.-H. The Characteristics of CNT/Cement Composites with Acid-Treated MWCNTs. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2015, 2015, 308725, doi:10.1155/2015/308725.
- [4] Stynoski, P.; Mondal, P.; Wotring, E.; Marsh, C. Characterization of silica-functionalized carbon nanotubes dispersed in water. *J. Nanopart. Res.* 2013, 15, 1396, doi:10.1007/s11051-012-1396-1.
- [5] Sikora, P.; Elrahman, M.A.; Chung, S.-Y.; Cendrowski, K.; Mijowska, E.; Stephan, D. Mechanical and microstructural properties of cement pastes containing carbon nanotubes and carbon nanotube-silica core-shell structures, exposed to elevated temperature. *Cem. Concr. Compos.* 2019, 95, 193 - 204, doi:10.1016/j.cemconcomp.2018.11.006.
- [6] Mendoza-Reales, O.A.; Sierra-Gallego, G.; Tob ó n, J.I. The mechanical properties of Portland cement mortars blended with carbon nanotubes and nanosilica: A study by experimental design. *DYNA* 2016, 83, 136 - 141, doi:10.15446/dyna.v83n198.55559.
- [7] Li, W.; Ji, W.; Torabian Isfahani, F.; Wang, Y.; Li, G.; Liu, Y.; Xing, F. Nano-silica sol-gel and carbon nanotube coupling effect on the Performance of Cement-Based Materials. *Nanomaterials* 2017, 7, 185, doi:10.3390/nano7070185.
- [8] Cardellicchio, L. On conservation issues of contemporary architecture: The technical design development and the ageing process of the Jubilee Church in Rome by Richard Meier. *Front. Archit. Res.* 2018, 7, 107 - 121, doi:10.1016/j.foar.2018.03.005.
- [9] Cardellicchio, L. Self-cleaning and colour-preserving efficiency of photocatalytic concrete: Case study of the Jubilee Church in Rome. *Build. Res. Inf.* 2019, 1 - 20, doi:10.1080/09613218.2019.1622405.