

补充胶凝材料和化学添加剂对水凝混凝土物理、力学和耐久性能影响的综述

泰俊·卡西克, 李贤烨, 杨承敏, 苏比亚帕克
结构工程系, 汉阳大学, 韩国

摘要: 掺入辅助胶凝材料 (SCM) 和化学添加剂 (CA) 以改变混凝土的性能。在本文中, 粉煤灰 (FA)、粒状高炉渣 (GGBS)、硅灰 (SF)、稻壳灰 (RHA)、甘蔗渣灰 (SBA) 和轮胎衍生燃料灰 (TDFA) 等 SCM)) 对混合混凝土进行审查。FA (25 - 30%)、GGBS (50 - 55%)、RHA (15 - 20%) 和 SBA (15%) 可安全用于替代波特兰水泥。FA 需要活化, 而 GGBS 经历了原位活化, 其中存在其他碱。RHA 和 SBA 中的活性二氧化硅很容易与水泥基体中的游离 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应, 从而产生二次 C-S-H 凝胶并赋予混凝土强度。SF 添加涉及混凝土中的物理作用和化学作用。TDFA 含有 25-30% 的 SiO_2 和 30-35% 的 CaO , 被认为是一种合适的二次火山灰材料。在这篇综述中, 特别强调了各种化学添加剂及其在保护钢筋免受腐蚀方面的作用。还讨论了用于新应用的专用混凝土, 即自固化、自修复、超疏水、电磁 (EM) 波屏蔽和自调温混凝土。

关键词: 辅助胶凝材料; 化学添加剂; 缓蚀剂; 特种混凝土; 钢筋腐蚀

Review of the Effects of Supplementary Cementitious Materials and Chemical Additives on the Physical, Mechanical and Durability Properties of Hydraulic Concrete

Taejoon Karthick, Hyun-Yeop Lee, Seung-Min Yang, Subbiah Parke
Department of Structural Engineering, Hanyang University, Korea

Abstract: Supplementary cementitious materials (SCMs) and chemical additives (CA) are incorporated to modify the properties of concrete. In this paper, SCMs such as fly ash (FA), ground granulated blast furnace slag (GGBS), silica fume (SF), rice husk ash (RHA), sugarcane bagasse ash (SBA), and tire-derived fuel ash (TDFA) admixed concretes are reviewed. FA (25-30%), GGBS (50-55%), RHA (15-20%), and SBA (15%) are safely used to replace Portland cement. FA requires activation, while GGBS has undergone in situ activation, with other alkalis present in it. The reactive silica in RHA and SBA readily reacts with free $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in cement matrix, which produces the secondary C-S-H gel and gives strength to the concrete. SF addition involves both physical contribution and chemical action in concrete. TDFA contains 25-30% SiO_2 and 30-35% CaO , and is considered a suitable secondary pozzolanic material. In this review, special emphasis is given to the various chemical additives and their role in protecting rebar from corrosion. Specialized concrete for novel applications, namely self-curing, self-healing, superhydrophobic, electromagnetic (EM) wave shielding and self-temperature adjusting concretes, are also discussed.

Keywords: supplementary cementitious materials, chemical additives, corrosion inhibition, special concretes, reinforcement corrosion

引言:

水泥一直是建筑行业的主要材料,也是世界上使用最多的材料之一,仅次于水。对波特兰水泥的需求日益增加,因此水泥行业增加了水泥产量。同时,环境中的二氧化碳排放足迹主要来自水泥生产,因为水泥行业每吨熟料排放 850 公斤二氧化碳。因此,考虑到环境因素,单片机已被用作水泥替代材料。ASTM C125 将外加剂定义为除水、骨料、水硬水泥或纤维增强材料以外的材料,用作混凝土或砂浆的成分,并在混合前或混合过程中立即添加到批料中。ACI 委员会 212 列出了使用外加剂的 20 个重要目的,包括在不增加含水量的情况下增加混凝土的可塑性、减少泌水和离析、延缓或加快凝固所需的时间、加快强度发展的早期速度,以降低放热速率,并提高混凝土在特定暴露条件下的耐久性。

已经对各种 SCM 和 CA 混合混凝土进行了大量研究。通过在混凝土中添加各种 SCM 和 CA,可以增强混凝土的性能。此外,大多数 SCM 是工业废料,即粉煤灰 (FA)、稻壳灰 (RHA)、磨碎的高炉渣 (GGBFS)、甘蔗渣灰 (SBA)、硅灰 (SF),偏高岭土 (MK) 等。这些 SCM 含有 SiO_2 和 Al_2O_3 ,它们在存在水分的情况下与氢氧化钙发生反应,从而产生胶凝性能 (ASTM C595)。在混凝土中添加 SCM 不仅可以最大限度地减少水泥含量,还可以降低成本和环境污染。化学添加剂 (CA) 实际上是在搅拌过程中添加到混凝土中的,其目的包括降低混凝土成本,比其他方式更有效地实现混凝土的某些性能,以及在搅拌阶段保持混凝土的质量,在恶劣的天气条件下运输、放置和固化,并克服混凝土施工过程中的紧急情况。在混凝土中添加 CA 能够保护钢筋在腐蚀性环境中免受腐蚀。有趣的是,通过添加适当的 CA,可以制备自固化、自愈、超疏水、电磁 (EM)、波屏蔽和自调温混凝土。

本综述的主要重点是证明辅助胶凝材料和化学添加剂对水硬混凝土的物理、机械和耐久性性能的影响。它旨在详细阐述 SCM (FA、GGBS、SF、RHA、SBA 和 TDFA) 和 CA (腐蚀抑制、自固化、自修复、超疏水、电磁 (EM) 波屏蔽和自温) 的有效利用调整) 关于混凝土的不同特性。本综述旨在让研究人员选择最适合普通和水工混凝土的 SCM 和 CA,因为它们具有更好的物理、机械和耐久性特性。

一、补充胶凝材料 (SCM)

FA、GGBS、SF、RHA、SBA 和 TDFA 等 SCM 通常添加到混凝土中。除了降低成本和提高新拌混凝土

的和易性外,它们还可以成功地用于提高混凝土的抗热裂性、抗碱骨料反应、抗氯化物扩散和抗硫酸盐性能。ASTM 有单独的分类,涵盖天然火山灰、飞灰、GGBS 等。ASTM C618 包含在波特兰水泥混凝土中用作 SCM 外加剂的粉煤灰和未加工或煅烧天然火山灰的标准规范。该规范对细度、需水量、火山灰活性、稳定性和化学成分设定了限制。

粉煤灰 (FA)

飞灰是煤粉或煤粉燃烧产生的细碎残留物。图 1 给出了世界范围内 FA 的生产和利用情况。粉煤灰通常比水泥更细,由玻璃状球形颗粒组成。飞灰在混凝土中的使用始于 1930 年代初期的美国。Davis 等人和 Kohoku 在 1948 年利用 120,000 公吨飞灰建造匈牙利马坝进行了重大突破性研究。在过去 30 年中,水泥工业中使用的飞灰不到 20% 路面施工。超过 28 天的固化后强度显著增加。ASTM C618 根据燃烧的煤的化学成分和类型,将 FA 分为两大类,即“C”类和“F”类。F 类飞灰来自无烟煤或烟煤的燃烧,而 C 级飞灰来自褐煤或次烟煤的燃烧。C 类粉煤灰通常由于游离石灰而具有凝硬性质,此外还具有胶结性质;另一方面,仅与水混合时,F 级很少是水泥质的。

ASTM C-618 和 AASHTO M 295 标准中给出了飞灰的规格。美国交通研究委员会已经制定了规范和规范。含碳量和细度这两个性能会影响混凝土的含气量和需水量。由于表面积增加,更细的 FA 需要更多的水。更细的材料需要更多的引气剂,并且颗粒的大小对于良好的混合设计也很重要。碳含量也会影响需水量,因为碳会吸收更多的水。据报道,与非粉煤灰混凝土相比,粉煤灰与波特兰水泥混合会增加胶凝化合物的体积,因为浆料体积增加,从而减少骨料颗粒干扰并提高混凝土的和易性。粉煤灰颗粒的形状是球形的,这有助于通过滚珠轴承效应提高其可加工性。这是因为球形粉煤灰在混凝土搅拌过程中起到了微小的滚珠轴承的作用,降低了混凝土混合物中的摩擦力,从而提供了润滑效果,从而提高了混凝土的和易性。

加气和非加气混凝土混合物中使用的粉煤灰通常会减少泌水,因为对于给定的和易性,由于更大的细度体积和更低的含水量。发现两种飞灰都增加了混凝土的凝结时间;然而,凝结时间受混凝土中所用飞灰的特性和用量的影响。粉煤灰混凝土的强度取决于所用水泥的类型、粉煤灰的质量和养护温度。例如,在室温下测试时,含有 F 级的混凝土可能会在 3 或 7 天固化后产生较低的

强度。一般来说，粉煤灰混凝土的强度随着养护时间的延长而增加；然而，与非粉煤灰混凝土相比，寒冷天气条件下的强度增益受到的影响更大。因此，在寒冷的天气条件下使用粉煤灰时，有必要采取预防措施。布祖巴等人。研究了粉煤灰混凝土在除冰盐结垢条件下的不利影响。Thomas 对飞灰混凝土抗盐垢的现场和实验室研究进行了回顾。隆德等人。据报道，含有飞灰的混凝土具有良好的抗冻融循环能力。

粉煤灰增加了胶凝化合物，最大限度地减少了需水量，并减少了渗水通道，从而产生了具有低渗透性内部空隙的混凝土。通过火山灰活性，飞灰化学物质与水 and 氢氧化钙结合，形成额外的胶凝化合物，从而产生更密集的更高强度。这导致易受弱酸或其他硫酸盐侵蚀的氢氧化钙的量减少，并有效地减少了硫酸盐的劣化。粉煤灰与水泥化合物中的游离石灰发生化学结合，使其无法进行硫酸盐反应，这会降低混凝土的渗透性，同时也会减少导致硫酸盐反应的活性铝酸盐的数量。Saca 和 Georgescu 研究了在镁存在下含有飞灰的富含 C3A 的水泥的行为。Kim 等人以及 Mbessa 和 Pera 通过浸泡在硫酸铵溶液中比较了普通水泥和粉煤灰混合水泥混凝土的抗硫酸盐性能。他们观察到，粉煤灰混合水泥混凝土比对照混凝土具有更高的抗硫酸盐性。Barbhuiya 和 Kumala 用粉煤灰和超细粉煤灰研究了波特兰水泥的抗硫酸盐性。市售的 F 级飞灰 (FA) 和超细飞灰 (UFFA) 被用作水泥中的部分替代品。与 FA 相比，UFFA 的无定形含量高 18%。固化 28 天后，将 100 mm 立方体样品浸入浓度为 3% 的硫酸 (H_2SO_4 , $pH \approx 3$) 和浓度为 1.5% 的硝酸 (HNO_3 , $pH \approx 3$) 中长达 90 天。在硫酸环境中，用 30% 粉煤灰和 10% 超细粉煤灰替代水泥的混凝土混合物的抗压强度损失最小。与不含飞灰的混合物相比，该混合物的质量损失较少。然而，在含有较多飞灰的混合物中，质量损失也较少。在硝酸环境下，含 20% 粉煤灰和 10% 超细粉煤灰和 30% 粉煤灰和 10% 超细粉煤灰的混凝土混合料抗压强度损失最小。但含有 30% 粉煤灰和 10% 超细粉煤灰的混合物的质量损失小于含有 20% 粉煤灰和 10% 超细粉煤灰的混合物。

由于两个因素，粉煤灰 FA 的火山灰反应需要活化。首先，玻璃珠的玻璃状表面层致密、化学稳定并保护内部成分，这些成分是多孔的、海绵状的和无定形的。二是高 Si、Al、低 Ca 的二氧化硅-氧化铝玻璃链稳定；如果要开展活动，就必须解散链条。图 2 给出了飞灰活化过程的示意图。事实是，未处理的飞灰中存在未燃烧的

碳和硫可能会增强钢筋的腐蚀。未燃烧的碳含量是用于钢筋混凝土结构的飞灰的不良成分。除了各种有害影响外，它还增加了导电性。由于发电站的氧化气氛，飞灰中的硫通常以硫酸盐的形式存在，这会影响混凝土的剥落和破碎。粉煤灰化学活化的需要主要涉及玻璃的键断裂和三维网络结构的溶解。也有报道称，当存在 $Ca(OH)_2$ 时， SiO_2 在飞灰中的溶解度显着增加。热活化影响飞灰反应性和溶解动力学；通过热活化在升高的温度下发生明显更快的玻璃分解。根据文献，可以安全地使用高达 25% 至 30% 的粉煤灰来替代性能更好的波特兰水泥。为了获得更好的机械性能和耐腐蚀性能，粉煤灰的活化是必不可少的。发现活性粉煤灰水泥的性能与普通波特兰水泥 (OPC) 相当。活化后的粉煤灰颗粒比水泥颗粒小，可以增加连接度，在水泥颗粒之间形成不均匀凝胶，促进水泥凝结。粉煤灰早期是惰性的，与水泥颗粒的联系较弱。活性粉煤灰对 CaO 的强大吸收能力降低了阿利特 ($3CaO \cdot SiO$) 早期水合导致的液体过饱和程度。这可以加速阿利特水化，这意味着活性粉煤灰的水合物可以作为“晶种”促进 C-S-H 和 $Ca(OH)_2$ 的生长，有利于凝聚结构的形成。

硅灰 (SF)

硅灰已被广泛用作高性能混凝土的补充胶凝材料。硅粉又称“微硅粉”。它是在硅和硅铁合金生产过程中，在电炉中用煤还原高纯度石英而获得的副产品。硅灰还作为生产其他硅合金（如铬铁、锰铁、镁铁和硅钙）时的副产品收集。硅粉一般有干式和湿式两种形式。干二氧化硅储存在筒仓和料斗中，而湿产品储存在罐中。

硅灰由非常细小的玻璃状颗粒组成，其表面积约为 20,000 m^2/kg ，比普通水泥颗粒小约 100 倍。由于其极高的细度和高二氧化硅含量，它被有效地用作火山灰材料。Mohamed 和 Mohamed 报告说，添加不同比例的硅灰可以改善混凝土的力学性能。此外，对嵌入添加硅灰混凝土的钢的电化学研究表明电流密度最低，表明硅灰混凝土具有更好的耐腐蚀性。AASHTO 和 ASTM C1240 标准涵盖了在波特兰火山灰水泥 (PPC) 和砂浆中用作 SCM 的微硅粉，以减少小空隙和孔隙的数量。硅灰满足混凝土的物理和化学要求，并产生良好的光洁度。向混凝土本身添加硅灰会增加需水量；每添加一磅硅粉，就需要额外增加一磅水。这可以通过使用高效减水剂 (HRWR) 来克服。据报道，添加超过 10% 的硅灰后，混凝土会变得粘稠，从而提高和易性并增加初始坍落度。由于其流变特性，硅灰可减少出血。在混凝土中使用硅

灰可产生非常高强度和低渗透性的混凝土，同时还具有耐化学性。据报道，在相同的抗压强度水平下，断裂模量通常与常规混凝土相同或更高。Abbas 等人、Karakurt 和 Bayazit 研究了掺入硅灰的混凝土的气孔稳定性，表明硅灰的使用对气孔系统的产生和稳定性或冻融耐久性没有显著影响。一些研究人员已经表明，在混凝土中添加硅灰会降低渗透性。对硅灰混凝土进行的快速氯离子渗透性测试 (AASHTO 277) 显示，由于在硅灰存在下基体密度增加，氯离子渗透率 (8% 硅灰) 显著降低。

硅灰在水泥基体中的影响 硅灰在混凝土中的反应包括物理作用和化学作用。作为物理贡献，添加硅灰填充了水泥颗粒界面区域的空间。这种现象称为颗粒堆积。作为化学贡献，硅灰含有超过 90% 的高度无定形的 SiO_2 。因此，它是一种高反应性火山灰材料，很容易与氢氧化钙反应形成 C-S-H 凝胶并提供硬化混凝土。

甘蔗渣灰 (SBA)

甘蔗渣灰 (SBA) 是制糖工业的主要残留物。甘蔗渣是一种农业废料，在制糖工业中提取甘蔗汁后残留。提取后，纤维甘蔗 (甘蔗渣) 部分用作制糖工业的主要燃料用于发电。甘蔗渣燃烧后的剩余物质称为 SBA，属于废料。制糖业生产约 7260 万吨 SBA，这些 SBA 储存在垃圾填埋场并造成环境问题。安全和环境问题为研究界在建筑行业使用甘蔗渣灰提供了持续的动力，在建筑行业中，甘蔗渣被用作建造混凝土结构的二次火山灰材料。

研究表明，甘蔗渣中含有 63-70% 的二氧化硅；然而，最近的一些研究也表明，甘蔗渣中含有超过 76-80% 的 SiO_2 ，以及其他氧化物，即 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 。 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 是火山灰物质，与水泥混合时起到胶凝材料的作用。Bahurudeen 和 Santhanam 等人报告说，获得的甘蔗渣不能直接用于建筑，因为它需要研磨和热处理以提高细度和去除杂质。然而，最近的一些研究报告称，甘蔗渣不需要任何热处理。有时可能建议研磨以提高细度。据报道，在混凝土中添加甘蔗渣可提高水泥搅拌机的和易性，即当混凝土中添加甘蔗渣的量增加 (5-25%) 时，压实系数也会增加，这指的是改善了和易性。侯赛因等人。据报道，用 SBA 替代 30% 的水泥会增加其坍落度。辛格等人。研究了甘蔗渣灰与水泥的水合效果，即使在 10% 的替代水平下也观察到更好的性能。已发现蔗渣灰可改善混凝土的机械性能，包括稠度、凝结时间、和易性、抗压强度和渗透性。

轮胎衍生燃料灰 (TDFA)

随着汽车工业在全球范围内呈指数级增长，轮胎的使用量也在不断增加。每年生产约 16 亿条新轮胎，产生约 10 亿条需要妥善处理的旧轮胎。轮胎不会自然分解，因为它们是由不可生物降解的材料制成的。近年来，废旧轮胎的处理已成为主要的环境问题。与煤或木材混合的废轮胎被用作造纸工业、水泥窑和发电厂的燃料。从锅炉收集的燃烧废轮胎的残余物被称为轮胎衍生燃料灰 (TDFA)。废轮胎作为燃料的使用正在增加；因此，TDFA 的产量也有所增加，如果将其储存在垃圾填埋场，则会导致环境问题。这些安全和环境问题为研究界提供了持续的动力来研究 TDFA 在建筑行业中的应用，它被用作沥青混凝土中传统填料的替代品。TDFA 的化学成分见表 6。TDFA 含有 27.5-31.1% 的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO ，这些氧化物适用于火山灰材料。根据 ASTM C-618-08a，TDFA 被认为是 C 类火山灰，因为氧化物比例的总和超过 50%。与飞灰、RHA 和 SBA 等其他灰烬相比，TDFA 的 SiO_2 含量较低。Al-Akhras 和 Smadi 研究了 TDFA 作为水泥砂浆中的沙子替代物的效果。在他们的研究中，2.5%、5%、7.5% 和 10% 的 TDFA 替代了沙重。作者报告说，砂浆的可加工性随着 TDFA 百分比的增加而降低，这是由于与沙子相比，TDFA 具有更高的表面积和更低的密度。由于 TDFA 可以吸收更多的水，并降低和易性，因此在制备砂浆时需要适当的压实。赫荣等人。使用减水剂来增加混凝土的和易性。Al-Akhras 和 Smadi 报告说，TDFA 混凝土的空气含量随着 TDFA 百分比的增加而降低。此外，砂浆的终凝时间随着 TDFA 用量的增加而增加。同一作者表明，砂浆的抗压和抗弯强度随着 TDFA 百分比的增加而不断增加，最高可达 10%。此外，10% TDFA 砂浆比对照砂浆表现出更好的抗氯化物扩散和冻融破坏能力。赫荣等人。通过使用 TDFA 作为粉煤灰替代物浇注混凝土，研究了 TDFA 混凝土的耐久性。含 20% FA 的混凝土被 3.0-12% TDFA 替代。研究表明，3-12% TDFA 的 28 天抗压强度对混凝土的强度发展没有显著影响。但混凝土 90 天抗压强度连续增加，TDFA 分别增加了 6%、9% 和 12%，这是由于粉煤灰的长期强度发展。根据他们的实验结果，他们得出结论，含有 6.0% TDFA 的混凝土提高了强度发展并减少了孔隙率、碳化和氯化物扩散。崔等人。还研究了 TDFA 作为沥青混合料的替代填料。

二、化学添加剂/外加剂

化学外加剂是混凝土中除波特兰水泥、水和骨料之外的成分，在混合前或混合过程中以极少量添加到混凝

土中。将化学外加剂添加到混凝土中具有某些特定功能，包括作为引气剂、减水剂、缓凝剂或促进剂、减水剂和一些特殊的外加剂，如缓蚀、自固化、自愈、电磁屏蔽、自温度调节和疏水性能。在这篇综述中，特别强调了缓蚀、自固化、自愈、电磁屏蔽和自调温和疏水材料的化学外加剂及其在混凝土中的应用。

自固化混凝土

目前，高性能或高强度混凝土在大多数工业应用中得到广泛应用。高强度混凝土采用低水灰比设计，通过适当的外部水养护可以进一步提高混凝土的强度和耐久性。外养护时，混凝土表面有大量的水；然而，内部混凝土表面区域可能无法通过传统的外部固化得到适当的固化。这可能导致水化反应未完成，并导致强度损失和混凝土结构中形成微裂缝。雨水不足和缺水是干旱和半干旱地区的一个关键问题；自/内部固化是克服这个问题的潜在解决方案。最近，在浇注过程中向混凝土混合物中添加了含水或超吸收添加剂，通过它可以实现内部固化并减少微裂纹形成的过程。聚乙二醇、聚丙烯酸钠、聚丙二醇、聚乙烯醇和聚丙烯酰胺通常用于制造自固化混凝土。弗里德曼等人。据报道，基于多糖的超吸收聚合物的羧酸盐和硫酸盐作为内部固化剂表现更好。Hu 等人开发了一种基于 Ca^{2+} 的离子响应性高吸水性水凝胶，以实现混凝土的自固化和自愈以及提高混凝土结构的抗压强度。据报道，在混凝土中掺入不同浓度的聚乙二醇可以改善物理性能和保水性。聚乙二醇含有 OH- 基团，可以在混凝土浇注过程中吸水，在水泥水化反应过程中回水。Teja 等人。研究了含有 1% 和 2% 聚乙二醇和 5% 煅烧沸石的自固化混凝土的力学性能。在他们的研究中，他们得出结论，聚乙二醇煅烧沸石比对照混凝土具有更好的抗压强度。自固化混凝土由各种支撑物组成，可减少裂缝和收缩，从而提高混凝土的耐久性。自固化过程最有利的方面是它减少了固化过程中的劳动力需求。然而，要制造真正环保的混凝土结构，还需要进行更广泛的研究。

自愈混凝土

混凝土是世界范围内最常用的建筑材料之一，但由于混凝土的化学和干收缩，它很容易开裂。裂缝的形成缩短了混凝土的耐久性，因为它们为侵蚀性离子渗透到混凝土中提供了更容易的路径。因此，将自愈材料引入混凝土可能会增加其耐久性。自修复材料也称为自修复材料，通常可以使混凝土无需任何外部检查或人工参与即可自动修复裂缝。自愈混凝土可分为自愈型和自愈型。

自体愈合通过两种方法发生，水化和碳化。在水化愈合方法中，水分子在裂缝中传播，与裂缝上未水合的 Ca^{2+} 反应，从而愈合狭窄的裂缝。在碳化愈合过程中，未水合的水泥颗粒 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 与 CO_2 反应形成 CaCO_3 ，从而愈合混凝土中的裂缝。另一方面，在自主愈合中，已经研究了许多不同的方法，即微囊法、血管法、电沉积法和微生物法。然而，自主愈合需要一个触发器才能激活该过程。例如，微胶囊通常由裂纹发生触发。研究表明，环氧树脂填充的脲醛微胶囊和丙烯酸树脂填充的明胶微胶囊在压缩条件下具有良好的混凝土自愈性能。这是因为在加载条件下混凝土中会形成裂缝，这会破坏胶囊并释放固化裂缝所需的环氧树脂和丙烯酸树脂。王等人。研究了在实验室和现场条件下基于微胶囊的混凝土自愈性能的性能。在他们的研究中，他们使用脲醛树脂作为外壳，使用环氧树脂作为愈合剂。他们得出的结论是，在混凝土中添加微胶囊会导致更好的氯化物扩散阻力；然而，混凝土试样的微观结构显示出添加微胶囊的正面和负面影响。Al-Tabbaa 等人。研究了基于微胶囊的自愈混凝土在英国现场应用中的性能。在他们的研究中，微胶囊硅酸钠被用于自愈混凝土的浇注。他们得出的结论是，基于微胶囊的混凝土在减小裂缝宽度、裂缝深度和恢复混凝土结构的渗透性方面表现出改善。

自愈实际上是混凝土的一个古老而众所周知的现象，因为它具有一些天然的自愈特性。由于熟料矿物质的持续水化或氢氧化钙 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 的碳化，裂缝可能会在一段时间后愈合。然而，自体愈合仅限于小裂缝，仅在有水时有效且难以控制。尽管如此，混凝土可以被修改以建立自主裂缝愈合。

1969 年，自愈特性首次内置于聚合材料内部。1979 年和 1981 年出现了关于热塑性和交联系统自愈的出版物。90 年代，Dry 开始研究自愈混凝土和聚合物。虽然，直到 2001 年 White 等人。在 Nature 上发表了关于聚合物基材料自修复的论文，自修复材料的研究开始引起广泛关注。

超疏水混凝土

根据环境条件，钢筋混凝土可能容易开裂。由于混凝土结构具有天然的多孔性和亲水性，它们通过其微孔吸收水分和一些侵蚀性离子。吸收的水分子在极端寒冷的条件下会冻结，因此混凝土上的内应力会增加，从而在表面产生微裂纹。结果，耐久性降低，具有潜在的灾难性影响。在混凝土中加入疏水性可以防止水的吸收，这有助于减少冬季裂缝的形成。然而，混凝土的疏水机

理与其他材料并不完全相似。到目前为止，一些作者已经确定了一些化学混合方法的疏水特性。混凝土的仿生超疏水性能通过两种方法发生，即使用疏水材料进行涂层和外加剂。采用涂层技术的仿生超疏水制备具有较好的耐水性能，但涂层易受外力机械力剥落，也削弱了涂层与混凝土表面的附着力。

超疏水材料在浇筑过程中作为防水材料掺入混凝土中。可以使用硅烷和有机硅疏水材料开发仿生超疏水表面。例如，宋等人。研究了氟烷基硅烷与混凝土中混合填料的影响。在他们的研究中，他们报告说混凝土表面具有非常高的表面粗糙度和超疏水性，接触角为 $158 \pm 0.8^\circ$ 。卡西克等人。研究了掺入混凝土中富含纳米材料的 1H, 1H, 1H, 2H-全氟癸基-三乙氧基硅烷的影响。这种改性水泥砂浆具有优异的耐水性和超疏水性，接触角为 162° 。此外，Zhu 等人 和 Xue 等人研究了混凝土的整体疏水性，并通过使用辛基三乙氧基硅烷材料进行了改进。他们报告说，基于硅烷的材料提高了混凝土的防水性能和耐久性。然而，硅烷和有机硅价格昂贵，不能用于大型混凝土结构。这些材料还阻碍了水泥与水之间的水泥水化反应，严重降低了混凝土强度。刘等人。用粉煤灰制备疏水聚合物混凝土，使用不同类型的聚合物，如聚丙烯酸酯丁苯、橡胶胶乳和有机硅作为防水剂。研究了聚合物改性混凝土的力学和透水性能。在这项研究中，他们得出结论，1-2% 的聚合物适用于混凝土，并提高了混凝土的抗压和渗透性能。用于混凝土的有机硅防水剂表现出比其他两种聚合物更好的性能。其他研究人员已经检查了硬脂酸掺入混凝土的影响，因为它是一种低成本的疏水材料。然而，硬脂酸不溶于水，因此很难将其均匀混合到混凝土中。冯等人。用水性硬脂酸乳液制备混凝土，以提高混凝土混合物的内部疏水性。他们得出结论，硬脂酸乳液改性水泥砂浆具有更好的内部疏水性，接触角为 132° 。改性水泥砂浆的抗压和抗弯强度略低于对照水泥砂浆（16.2% 和 20.0%）。超疏水材料提高混凝土的表面粗糙度和内部疏水性；然而，在不影响混凝土通常的力学性能的情况下，长期应用需要进一步的实验研究，因为疏水材料会降低透水性的时间仍然未知。

结论

从本次审查可以得出以下结论：

-SCMs（如高达 25% 至 30% 的粉煤灰）可以安全地用于替代波特兰水泥，从而获得更好的性能。用粉煤灰大量替代波特兰水泥不仅有利于混凝土，而且可以最大

限度地减少水泥的生产，从而减少温室气体效应。

-机械研磨、热活化和化学活化加速粉煤灰与水泥的水化反应。为了获得更好的机械性能和耐腐蚀性能，粉煤灰的活化是必不可少的。活化方法增加了飞灰中连接点的数量，并在短时间内与水泥结合。活性粉煤灰混合水泥的屈服设计在 28 天内显示出与普通波特兰水泥相当的抗压强度。

-高达 50% 至 55% 的 GGBS 可以安全地用于替代具有更好性能的波特兰水泥。GGBS 经历了原位活化，其中存在其他碱。GGBS 中的活性成分具有高反应性；因此，它与水泥发生水化反应，形成体积庞大的硅酸钙水合物，导致孔隙堵塞作用。

-含量高达 10-15% 的甘蔗渣可以安全地用于替代具有更好性能的波特兰水泥。SBA 中存在的无定形二氧化硅与水泥基体中的游离 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应，产生二次 C-S-H 凝胶，提高混凝土的抗压强度。SBA 含有 Al_2O_3 ，它与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应，导致形成 C-A-H，可以减少硫酸盐的侵蚀。SBA 中未反应的二氧化硅作为孔隙填充剂，可以减少混凝土中的孔隙率和空隙，有利于提高抗氯化物渗透能力，降低钢筋的腐蚀速度。

-硅灰在混凝土中的反应包括物理作用和化学作用。作为物理贡献，添加硅灰填充了水泥颗粒界面区域的空隙。作为化学贡献，硅灰含有超过 90% 的高度无定形的 SiO_2 。因此，它是一种高反应性火山灰材料，很容易与氢氧化钙反应形成 C-S-H 凝胶并提供硬化混凝土。

-RHA 是一种有效的 SCM，在 15-20% 的波特兰水泥的最佳替代水平下，可提高强度并减少硫酸盐反应和氯化物扩散，以及嵌入钢筋的腐蚀速率。当活性二氧化硅处于无定形状态时，RHA 中的火山灰反应是有利的，导致形成额外的 C-S-H 凝胶，从而提高混凝土的强度和耐久性。

-SCM 混合混凝土可抵抗氯化物和硫酸盐的侵蚀。因此，含 SCM 的混凝土对于建造桥梁、核反应堆、港口、海岸和海洋环境区域等民用基础设施非常有用。

-随着 21 世纪汽车工业的快速发展，轮胎衍生的燃料灰可能会在建筑行业找到应用。TDFA 含有 25-30% 的 SiO_2 和 30-35% 的 CaO ，因此被认为是合适的火山灰材料。此外，TDFA 可用作水泥中的部分替代品，也可用作混凝土中的粗骨料。

-防腐外加剂的目的是保护钢筋免受腐蚀。它们是在浇筑阶段本身添加到混凝土中的。因此，在建造任何新的混凝土结构时，使用缓蚀剂是不可避免的。对于现

有的混凝土结构，可以采用迁移或电注方法来保护混凝土中的预埋钢筋。

-在缺水是一个严重问题的干旱和半干旱地区，自固化混凝土是必不可少的。自固化混凝土可最大限度地减少混凝土的开裂和收缩，从而提高其耐久性。自固化混凝土的最大优势是消除了人工需求，绕过了施工后 28 天（对于 OPC）或 90 天（对于 PPC）的费力固化过程。

-混凝土中的自愈过程可以通过自愈、自愈和微生物方法来实现。在这三者中，混凝土能够自动修复裂缝，无需任何外部检查或人工参与。然而，这种方法仅限于较小的裂缝。

-超疏水化学外加剂可以通过表面涂层或通过混凝土外加剂应用于混凝土。在这两种方法中，防水材料都可以防水，并为混凝土和钢筋提供保护。

-电磁屏蔽混凝土在军事建筑和民用方面都有应用。EMI 屏蔽可以通过吸收或反射来实现。碳材料、特殊类型的导电聚合物和金属纤维在制造 EMI 屏蔽混凝土中发挥着重要作用。

-自调温混凝土在热带国家非常有用，因为室内混凝土建筑在夏季消耗更多的能源用于冷却。这可以通过在混凝土中使用相变材料（PCM）来实现，从而减轻热效应。

-纳米、地质聚合物、3D 打印/数字化生产、生物、自组装和有机-无机共聚等创新技术的整合可能很快与现有技术保持一致，以促进多用途结构的发展，并为建筑业提供福音。

参考文献：

[1]Environment U., Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-Efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cem. Concr. Res.* 2018;114:2 - 26.

[2]Sanjuán M.Á., Andrade C., Mora P., Zaragoza A. Carbon dioxide uptake by mortars and concretes made with portuguese cements. *Appl. Sci.* 2020;10:646. doi: 10.3390/app10020646.

[3]ASTM C125-21a . Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. ASTM; West Conshohocken, PA, USA: 2021.

[4]American Concrete Institute . ACI Committee 212, Admixtures for Concrete. American Concrete Institute; Farmington Hills, MI, USA: 1981. pp. 24 - 52.

[5]ASTM . C595/C595M-21, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. ASTM International; West Conshohocken, PA, USA: 2021.

[6]Yang Y., Lepech M.D., Yang E.-H., Li V.C. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cem. Concr. Res.* 2009;39:382 - 390. doi: 10.1016/j.cemconres.2009.01.013.

[7]Jacobsen S., Marchand J., Boisvert L. Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete. *Cem. Concr. Res.* 1996;26:869 - 881.

[8]Sahmaran M., Li M., Li V.C. Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. *ACI Mater. J.* 2007;104:604 - 611.

[9]Aldea C.-M., Song W.-J., Popovics J.S., Shah S.P. Extent of healing of cracked normal strength concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* 2000;12:92 - 96. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:1(92).

[10]Reinhardt H.-W., Jooss M. Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. *Cem. Concr. Res.* 2003;33:981 - 985. doi: 10.1016/S0008-8846(02)01099-2.