

浅论粉煤灰在混凝土中的应用及注意事项

陈 香

新疆北新科技创新咨询有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要：粉煤灰作为一种工业副产品，在混凝土中的应用已有多年的历史。本文首先剖析其作用机理，火山灰效应使粉煤灰与氢氧化钙反应生成胶凝物质，微集料效应填充孔隙，滚珠轴承效应改善流动性。进而探讨对混凝土工作性如流动性和粘聚性等、力学性能包括早期与后期强度以及耐久性的多方面影响。阐述在普通、高性能、大体积和预拌混凝土中的应用实践。强调应用时要严格把控粉煤灰质量，确定合适掺量，考量与外加剂相容性，合理调整配合比并重视养护工作，以充分发挥粉煤灰优势，保障混凝土工程质量。

关键词：粉煤灰混凝土；应用；注意事项

引言：在现代混凝土工程领域，粉煤灰的应用愈发关键。它源于工业生产过程中的废弃物，却能为混凝土带来显著变革。其特殊的组成结构让其在混凝土中通过多种效应发挥作用，进而改变混凝土的各项性能。深入理解粉煤灰在混凝土中的应用原理、影响效果以及应用过程中的关键注意事项，有助于在建筑实践中更好地利用这一资源，提升混凝土工程的综合品质，降低成本并促进可持续发展，为混凝土技术的进步提供有力支撑。

1 粉煤灰在混凝土中的作用机理

1.1 火山灰效应

粉煤灰富含的活性成分二氧化硅（ SiO_2 ）和氧化铝（ Al_2O_3 ），在混凝土碱性环境中与水泥水化生成的氢氧化钙（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）发生化学反应。此反应生成水化硅酸钙（C-S-H）和水化铝酸钙（C-A-H）等胶凝物质。这些胶凝产物填充于混凝土孔隙之中，使微观结构更加致密，有效提升混凝土的强度与耐久性。

1.2 微集料效应

粉煤灰颗粒粒径细小，可视为微小集料。其能填充在水泥颗粒间隙以及水泥水化产物的孔隙内，起到细化孔隙结构的作用。在混凝土的界面过渡区，粉煤灰的填充及其与水泥水化产物间的相互作用，强化了原本相对薄弱的界面。这不仅提高了混凝土的密实度，还优化了界面过渡区的结构，从而增强了混凝土整体的力学性能，使其在抗压、抗折等方面表现更为出色，同时也对耐久性的提升起到积极促进作用。

1.3 滚珠轴承效应

粉煤灰颗粒多呈球形且表面光滑。在混凝土拌合物中，它们如同微小的滚珠，显著降低了水泥颗粒、集料颗粒之间的摩擦阻力。这使得混凝土拌合物的流动性得以大幅提高，在保持相同工作性要求时，可减少混凝土

的用水量，进而降低水胶比。较低的水胶比有利于提高混凝土的强度与耐久性，并且在泵送混凝土施工中，该效应能够有效降低泵送阻力，确保混凝土顺利泵送，保障施工的高效进行^[1]。

2 粉煤灰对混凝土性能的影响

2.1 工作性能

2.1.1 流动性改善

粉煤灰的滚珠轴承效应是改善混凝土流动性的关键。由于其球形且光滑的颗粒特性，在混凝土拌合物中起到类似滚珠的作用，有效减少了内部颗粒间的摩擦力。这使得混凝土在保持原有坍落度的情况下，能够减少用水量。例如，在一些泵送混凝土工程中，适量掺入粉煤灰后，坍落度可显著提高，原本难以泵送的混凝土变得易于操作，减少了泵送过程中的堵塞风险，大大提高了施工效率，同时也有利于混凝土在模板内的均匀填充，确保结构的密实性与整体性。

2.1.2 粘聚性和保水性增强

粉煤灰的微集料效应和火山灰反应生成的胶凝物质共同作用，增强了混凝土拌合物的粘聚性和保水性。粉煤灰填充于孔隙中，减少了泌水通道，使得混凝土各组分之间结合更为紧密，不易出现离析现象。在大体积混凝土施工中，良好的粘聚性可防止粗集料下沉、砂浆上浮，保水性则避免了水分过快散失导致的表面干缩裂缝。

2.2 力学性能

2.2.1 早期强度发展

粉煤灰的火山灰反应在早期较为迟缓，其取代部分水泥后，致使混凝土早期生成的胶凝产物减少，强度增长速度放慢。如在预制混凝土构件生产时，若粉煤灰掺量过高，3-7天内抗压强度会比普通混凝土低15%-25%，这可能延误生产进度，影响构件的早期脱模与起吊，因

此对早期强度要求高的工程需谨慎控制粉煤灰掺量。

2.2.2 后期强度增长

随着龄期增加,粉煤灰中的活性成分持续与氢氧化钙反应,生成更多胶凝物质填充孔隙,优化微观结构。在28天至90天期间,强度显著提升。像大型桥梁基础等长期承载结构,采用适量粉煤灰的混凝土,其90天抗压强度可比28天提高20%-30%,后期强度的良好发展保障了结构长期安全性。

2.3 耐久性

2.3.1 抗渗性提高

粉煤灰的微集料效应使其填充于混凝土孔隙,火山灰反应生成的胶凝物质进一步细化孔隙结构,降低孔隙率。在地下室混凝土墙体中,这种致密结构有效阻碍水分渗透。试验表明,掺粉煤灰混凝土的渗水高度可比普通混凝土降低30%-50%,显著增强了混凝土的抗渗能力,减少潮湿环境对结构的侵蚀,延长结构使用寿命。

2.3.2 抗冻性改善

粉煤灰优化孔隙结构,减少可冻水含量,且生成的胶凝物质增强混凝土密实度。在寒冷地区的道路混凝土中,经多次冻融循环后,掺粉煤灰混凝土的质量损失率可比普通混凝土降低20%-40%,强度损失也明显减少。这得益于其良好的孔隙结构和较强的内部粘结力,使其能更好地承受冻融破坏,维持结构稳定性^[2]。

2.3.3 抗化学侵蚀性增强

粉煤灰混凝土致密的孔隙结构限制化学侵蚀介质侵入,其水化产物稳定性高。在化工园区的建筑结构中,面对酸、碱、盐等侵蚀物质,掺粉煤灰的混凝土表面腐蚀程度明显轻于普通混凝土,能有效抵抗化学侵蚀。其特殊的化学组成和微观结构为混凝土提供了一道防护屏障,保障结构在恶劣化学环境中的耐久性。

3 粉煤灰在混凝土中的应用

3.1 在普通混凝土中的应用

粉煤灰可替代部分水泥,通常取代率在15%-25%之间。其微集料效应和滚珠轴承效应能有效改善混凝土的工作性能,使混凝土拌合物更加均匀、易于施工,减少了振捣过程中的能耗与时间。例如在一般民用建筑的框架结构施工中,掺入粉煤灰的混凝土能更好地填充模板,确保结构的密实性。从力学性能来看,虽然早期强度会有一定程度降低,但后期强度增长显著,足以满足结构设计要求。同时,由于减少了水泥用量,降低了混凝土生产成本,减少了水泥生产过程中的二氧化碳排放,具有良好的经济效益与环境效益。在耐久性方面,其改善的孔隙结构可提高混凝土的抗渗性与抗化学侵蚀

性,延长建筑物的使用寿命,尤其适用于一般环境下的建筑物基础、梁、柱等结构部位。

3.2 在高性能混凝土中的应用

在高性能混凝土中,粉煤灰与高效减水剂等外加剂协同作用。通过精确控制粉煤灰的掺量(一般在10%-30%)和品质,能够优化混凝土的微观结构。其微集料效应填充孔隙,火山灰效应生成更多胶凝物质,使混凝土更加致密。在大型桥梁的建设中,这种致密结构可承受巨大的交通荷载与恶劣的自然环境。高流动性使得混凝土在复杂的模板体系中能够顺利浇筑,坍落度可轻松达到200mm以上,同时28天抗压强度可达80MPa甚至更高。在耐久性方面,抗渗性、抗冻性和抗化学侵蚀性的显著提升,确保了高性能混凝土结构在长期使用过程中性能稳定,如跨海大桥的桥墩、超高层建筑的核心筒等关键部位,粉煤灰高性能混凝土为其提供了卓越的性能保障。

3.3 在大体积混凝土中的应用

粉煤灰在大体积混凝土中的应用优势明显。其取代水泥的比例通常在20%-40%之间。由于粉煤灰早期水化反应缓慢,大量取代水泥后可有效降低水化热峰值,减少混凝土内部因温度应力产生裂缝的风险。例如在大坝工程中,大体积混凝土需要长时间稳定硬化,粉煤灰的应用使内部温度变化更为缓和。粉煤灰的微集料效应进一步改善了混凝土的内部结构,增强了抗裂性能与密实度。在后期,粉煤灰持续的火山灰反应保证了混凝土强度的稳定增长,满足大体积混凝土长期承载的要求,确保了大坝等大型水利设施的结构安全性与耐久性,降低了因裂缝导致的渗漏风险,保障了水利工程的正常运行与周边生态环境的稳定。

3.4 在预拌混凝土中的应用

预拌混凝土的生产与供应需要满足不同工程、不同施工条件的需求,粉煤灰在其中有着多样的应用方式。在预拌混凝土生产过程中,粉煤灰的滚珠轴承效应可提高混凝土拌合物的流动性,减少运输与泵送过程中的阻力。在城市高层建筑泵送施工中,掺入适量粉煤灰可使混凝土顺利到达高层作业面,提高施工效率。其微集料效应和火山灰效应增强了混凝土的粘聚性与保水性,减少了离析和泌水现象。在不同季节,粉煤灰的应用可灵活调整。夏季高温时,适当增加粉煤灰掺量可补偿因水分蒸发导致的坍落度损失,保证混凝土的施工性能;冬季低温时,通过优化粉煤灰与其他外加剂的配合,促进混凝土早期强度发展,满足施工进度要求。

4 粉煤灰在混凝土应用中的注意事项

4.1 粉煤灰的质量控制

粉煤灰质量对混凝土性能影响重大。需从多方面把控,包括稳定的供应源,避免来源混杂导致质量波动。在存储环节,防止受潮、受污染,确保其活性成分不被破坏。同时建立严格的检验制度,定期抽样检测,依据检测结果调整使用策略,保证每一批次粉煤灰都能符合混凝土生产要求,从而保障混凝土质量的稳定性与可靠性,为工程结构安全奠定基础。

4.2 化学成分分析

粉煤灰化学成分决定其活性与适用性。主要关注活性成分如 SiO_2 、 Al_2O_3 含量,含量越高火山灰活性越好。但也要注意有害成分,例如 SO_3 含量过高会引起混凝土体积安定性问题。像一些工业排放的粉煤灰,可能因煤种或燃烧工艺问题导致化学成分异常。所以在使用前必须进行精准的化学成分分析,确保其符合相关标准与混凝土设计要求,以促进粉煤灰在混凝土中发挥积极作用并避免潜在危害。

4.3 物理性质检测

4.3.1 粉煤灰掺量的确定

粉煤灰掺量需综合考量多因素确定。工程类型是关键,如早期强度要求高的预制构件生产,掺量宜控制在10%-15%;而大体积混凝土工程对后期强度和耐久性要求高,掺量可适当提高至20%-30%。水泥品种与强度等级也有影响,不同水泥与粉煤灰反应程度不同。此外,还需结合外加剂使用情况,通过大量试验找到最优掺量范围,既满足混凝土性能要求,又能实现成本控制与资源有效利用,确保工程质量与效益的平衡。

4.3.2 与其他外加剂的相容性

粉煤灰与外加剂相容性至关重要。部分粉煤灰含碳量高,易吸附减水剂,降低减水效果,导致混凝土坍落度损失加快。与引气剂共用时,会改变混凝土含气量,影响抗冻性等性能。在使用复合外加剂时,情况更为复杂。所以在混凝土配合比设计前,必须进行相容性试验,根据试验结果调整外加剂种类或掺量,确保粉煤灰与外加剂协同作用,优化混凝土工作性、力学性能和耐

久性,避免因不相容导致混凝土性能劣化。

4.4 混凝土配合比设计调整

当掺入粉煤灰后,混凝土配合比需精细调整。首先依据粉煤灰掺量减少水泥用量,以维持强度等级。根据粉煤灰需水量比调整用水量,保证工作性。由于粉煤灰密度与水泥不同,计算集料用量时要修正。例如在设计C30混凝土配合比时,若掺入20%粉煤灰,水泥用量减少的同时,需综合考虑粉煤灰特性确定新的用水量与集料用量。通过多次试配与性能测试,确定最优配合比,使混凝土在工作性、力学性能和耐久性等方面达到最佳平衡^[1]。

4.5 混凝土的养护

粉煤灰混凝土养护要求更为严格。因其早期强度发展慢,浇筑后应立即保湿养护,防止表面水分散失过快。养护时间宜长于普通混凝土,一般不少于14天,对大体积或耐久性要求高的混凝土,养护时间可延至28天甚至更久。在冬季,需采取保温措施,防止混凝土受冻。如在桥梁墩柱混凝土施工中,若养护不到位,粉煤灰混凝土易出现表面裂缝、强度不足等问题,影响结构安全性与耐久性,所以养护环节必须高度重视并规范执行。

结束语

粉煤灰在混凝土中的应用为建筑行业带来诸多益处,其火山灰效应、微集料效应和滚珠轴承效应显著改善混凝土工作性、力学性能与耐久性,在普通、高性能、大体积及预拌混凝土中均发挥关键作用。然而,应用时需严谨把控粉煤灰质量,精确确定掺量,妥善处理与外加剂相容性,合理调整配合比并重视养护。

参考文献

- [1]李赵相,毛志毅,白锡庆.水泥和混凝土用脱硝粉煤灰中氮检测及应用研究[J].天津建设科技,2021,31(06):52-58.
- [2]张璐,乔雪健,王瑞婷,张磊,王岩.高性能混凝土的应用技术研究[J].四川建材,2021,47(10):15-16.
- [3]李志勇,辛民,刘星乐,田向红.粉煤灰陶粒混凝土隔离墙的研究与应用[J].煤矿安全,2021,52(07):79-83.