

混凝土外加剂对混凝土早期强度发展的影响机制

钟淇

广东稳固检测鉴定有限公司, 广东 广州 511453

DOI:10.61369/UAID.2025010018

摘 要： 混凝土外加剂是改善混凝土性能的重要手段之一，尤其在提高混凝土早期强度方面具有显著效果。本文主要探讨了混凝土外加剂对混凝土早期强度发展的影响机制，分析了不同种类外加剂的作用原理，包括减水剂、早强剂、缓凝剂等，并讨论了它们对水泥水化过程、微观结构以及宏观性能的影响。通过实验数据和理论分析，本文旨在为混凝土的优化配制和工程应用提供科学依据。

关 键 词： 混凝土外加剂；早期强度；水泥水化

The Influence Mechanism of Concrete Admixtures on the Early Strength Development of Concrete

Zhong Qi

Guangdong Guodu Testing and Appraisal Co., LTD. Guangzhou, Guangdong 511453

Abstract： Concrete admixtures are one of the important means to improve the performance of concrete, especially having a remarkable effect in enhancing the early strength of concrete. This paper mainly explores the influence mechanism of concrete admixtures on the early strength development of concrete, analyzes the working principles of different types of admixtures, including water reducers, early strength agents, retarders, etc., and discusses their influences on the hydration process, microstructure and macroscopic properties of cement. Through experimental data and theoretical analysis, this paper aims to provide a scientific basis for the optimal preparation and engineering application of concrete.

Keywords： concrete admixture; early strength ; cement hydration

引言

混凝土作为建筑材料，其性能的优劣直接影响到建筑工程的质量和耐久性。混凝土的早期强度发展是决定混凝土能否及时承受荷载、缩短工期的关键因素。混凝土外加剂的使用可以显著改善混凝土的工作性、强度、耐久性等性能。因此，研究外加剂对混凝土早期强度发展的影响机制，对于混凝土材料的科学配制和工程应用具有重要意义。

一、混凝土早期强度发展理论基础

（一）混凝土早期强度形成机制

混凝土早期强度的形成是一个复杂的物理化学过程，其核心在于水泥的水化反应。水泥水化反应是指水泥与水发生化学反应，生成一系列水化产物，并伴随着放热现象。这个过程大致可以分为几个阶段：首先是水泥颗粒的溶解，水分子进入水泥颗粒内部，与水泥中的矿物成分发生反应；其次是水化产物的形成和生长，生成的主要水化产物包括硅酸钙水合物（C-S-H凝胶）、钙矾石（AFt）、氢氧化钙（CH）等；最后是水化产物的硬化和发展，逐渐填充水泥颗粒之间的空隙，形成致密的结构，从而产生强度^[1]。其中，C-S-H凝胶是混凝土早期强度的主要贡献者，它具有极高的比表面积和活性，能够有效地胶结水泥颗粒，形成

空间网络结构。AFt则具有膨胀作用，可以填充水泥颗粒之间的空隙，提高混凝土的密实度。这些水化产物的形成和作用，共同决定了混凝土的早期强度。因此，深入理解水泥水化反应的基本过程及其对早期强度的影响，对于控制混凝土的早期强度发展具有重要的意义。

（二）影响混凝土早期强度的关键因素

混凝土早期强度的发展受到多种因素的影响，其中水灰比、水泥细度、养护温度等是关键因素。水灰比是指混凝土中水的用量与水泥用量的比值，它直接影响水泥的水化反应和混凝土的密实度。水灰比过高会导致多余的水分蒸发后留下孔隙，降低混凝土的密实度和强度；水灰比过低则会影响水泥的水化反应，同样不利于强度的形成。水泥细度是指水泥颗粒的大小，它影响水泥的水化速率和程度。水泥颗粒越细，其比表面积越大，与水接触

的面积也越大,水化反应速率越快,早期强度越高。养护温度是指混凝土硬化过程中的环境温度,它影响水泥的水化反应速率。养护温度越高,水泥的水化反应速率越快,早期强度发展越快;但过高的养护温度也可能导致混凝土内部产生温度应力,影响混凝土的长期性能^[2]。此外,外加剂对水泥水化进程的调控作用也是影响混凝土早期强度的重要因素。不同的外加剂可以通过不同的作用机制,影响水泥的水化反应速率、水化产物的形成和生长,从而调控混凝土的早期强度发展。例如,减水剂可以通过降低水灰比,提高混凝土的密实度,从而提高早期强度;早强剂可以加速水泥的水化反应,促进早期强度的形成;缓凝剂可以延缓水泥的水化反应,控制混凝土的凝结时间,避免早期强度过快增长导致的开裂等问题。因此,深入理解这些关键因素对混凝土早期强度的影响,对于优化混凝土配合比设计,提高混凝土的早期强度和耐久性具有重要的意义^[3]。

二、混凝土外加剂的作用机理

(一) 常见外加剂的类型及其功能

混凝土外加剂种类繁多,每种外加剂都有其独特的功能和应用场景。早强剂其主要作用是提高混凝土的早期强度。常见的早强剂包括硫酸盐、氯盐等。硫酸盐早强剂的作用机理主要是通过提供硫酸根离子,与水泥水化产物中的铝酸钙反应,生成钙矾石(Aft),钙矾石的生成过程伴随着体积膨胀,可以填充水泥颗粒之间的空隙,提高混凝土的密实度和早期强度。同时,硫酸根离子还可以加速C3S的水化,促进早期强度的形成。氯盐早强剂则主要通过提供氯离子,与水泥水化产物中的C3A反应,生成水化氯铝酸钙,加速水泥的水化反应,提高早期强度。但需要注意的是,氯盐早强剂的掺量需要严格控制,过量的氯离子会导致钢筋锈蚀,影响混凝土结构的耐久性。减水剂是应用最广泛的外加剂之一,其主要作用是降低混凝土的用水量,提高混凝土的流动性。常见的减水剂包括萘系减水剂和聚羧酸系减水剂。萘系减水剂的分散作用机理主要是通过其分子结构中的磺酸基团吸附在水泥颗粒表面,形成一层稳定的吸附膜,利用静电斥力使水泥颗粒相互分散,从而释放出包裹在水泥颗粒之间的自由水,提高混凝土的流动性^[4]。聚羧酸系减水剂则主要通过其分子结构中的羧酸基团和聚氧乙烯基团吸附在水泥颗粒表面,形成一层较厚的吸附膜,利用空间位阻效应使水泥颗粒相互分散,其减水效果优于萘系减水剂。减水剂能降低水灰比,提升混凝土强度和密实度,改善工作性能,减少施工难度。引气剂通过引入微小封闭气泡,增强混凝土和易性、抗冻性和抗渗性。其作用机理是降低水表面张力,形成气泡。缓凝剂延缓混凝土凝结,保证施工质量。其作用机理是吸附水泥颗粒表面,阻碍水化反应,或与水化产物反应生成络合物。其他外加剂如防水剂、膨胀剂等,各有特定作用机理,可根据工程需求选用^[5]。

(二) 外加剂对水泥水化过程的影响

外加剂对水泥水化过程的影响是外加剂作用机理的核心。不同的外加剂通过不同的方式影响水泥的水化反应速率、水化产物

的形成和生长。减水剂主要通过改善水泥颗粒的分散性,提高水泥与水的接触面积,从而加速水泥的水化反应。同时,减水剂还可以影响水化产物的形成,例如,聚羧酸系减水剂可以促进C-S-H凝胶的生成,提高混凝土的早期强度。早强剂则主要通过提供离子或形成新的水化产物,加速水泥的水化反应,促进早期强度的形成。例如,硫酸盐早强剂可以提供硫酸根离子,与水泥水化产物中的铝酸钙反应,生成钙矾石(Aft),钙矾石的生成可以加速C3S的水化,提高早期强度。外加剂与水泥矿物成分的相互作用也是影响水泥水化过程的重要因素。不同的水泥矿物成分对外加剂的吸附能力不同,导致外加剂的作用效果也不同^[6]。例如,C3A对减水剂的吸附能力较强,会降低减水剂的有效浓度,影响减水效果。因此,在使用外加剂时,需要考虑水泥的矿物成分,选择合适的外加剂种类和掺量。

(三) 外加剂对混凝土孔结构和微观形貌的影响

外加剂对混凝土孔结构和微观形貌的影响直接关系到混凝土的强度和耐久性。减水剂可以通过降低水灰比,减少混凝土中的孔隙率,改善孔径分布,使孔径向小尺寸方向发展,从而提高混凝土的密实度和强度。同时,减水剂还可以改善水化产物的微观形貌,使C-S-H凝胶更加均匀、致密,提高混凝土的强度和耐久性。引气剂引入的气泡可以细化混凝土的孔径分布,提高混凝土的抗冻性和抗渗性。早强剂可以促进水化产物的早期生成,填充水泥颗粒之间的空隙,提高混凝土的密实度和早期强度。缓凝剂可以延缓水泥的水化反应,避免混凝土内部产生过大的温度应力,减少裂缝的产生,提高混凝土的耐久性。因此,外加剂对混凝土孔结构和微观形貌的影响是多方面的,需要综合考虑外加剂的种类、掺量以及混凝土的配合比等因素,才能充分发挥外加剂的作用,实现混凝土性能的优化^[7]。

三、外加剂对混凝土早期强度发展的影响机制分析

(一) 常见外加剂的类型及其功能

混凝土外加剂种类繁多,每种外加剂都有其独特的功能和应用场景。早强剂,顾名思义,其主要作用是提高混凝土的早期强度。常见的早强剂包括硫酸盐、氯盐等。硫酸盐早强剂的作用机理主要是通过提供硫酸根离子,与水泥水化产物中的铝酸钙反应,生成钙矾石(Aft),钙矾石的生成过程伴随着体积膨胀,可以填充水泥颗粒之间的空隙,提高混凝土的密实度和早期强度。同时,硫酸根离子还可以加速C3S的水化,促进早期强度的形成。氯盐早强剂则主要通过提供氯离子,与水泥水化产物中的C3A反应,生成水化氯铝酸钙,加速水泥的水化反应,提高早期强度^[8]。但需要注意的是,氯盐早强剂的掺量需要严格控制,过量的氯离子会导致钢筋锈蚀,影响混凝土结构的耐久性。减水剂是应用最广泛的外加剂之一,其主要作用是降低混凝土的用水量,提高混凝土的流动性。常见的减水剂包括萘系减水剂和聚羧酸系减水剂。萘系减水剂的分散作用机理主要是通过其分子结构中的磺酸基团吸附在水泥颗粒表面,形成一层稳定的吸附膜,利用静电斥力使水泥颗粒相互分散,从而释放出包裹在水泥颗粒之

间的自由水,提高混凝土的流动性。聚羧酸系减水剂则主要通过其分子结构中的羧酸基团和聚氧乙烯基团吸附在水泥颗粒表面,形成一层较厚的吸附膜,利用空间位阻效应使水泥颗粒相互分散,其减水效果优于萘系减水剂。减水剂的掺入不仅可以降低水灰比,提高混凝土的密实度和强度,还可以改善混凝土的工作性能,降低施工难度。引气剂的主要作用是在混凝土中引入大量微小的、封闭的气泡,这些气泡可以改善混凝土的和易性,提高混凝土的抗冻性和抗渗性。引气剂通常为表面活性剂,其作用机理主要是通过降低水的表面张力,在搅拌过程中引入大量气泡。缓凝剂的主要作用是延缓混凝土的凝结时间,避免混凝土在施工过程中过快凝结,影响施工质量。缓凝剂的作用机理主要是通过吸附在水泥颗粒表面,阻碍水泥的水化反应,或者通过与水泥水化产物反应,生成稳定的络合物,延缓水泥的水化进程。其他外加剂,如防水剂、膨胀剂等,也都有其特定的作用机理,可以根据工程需要选择使用^[9]。

(二) 外加剂对水泥水化过程的影响

外加剂对水泥水化过程的影响是外加剂作用机理的核心。不同的外加剂通过不同的方式影响水泥的水化反应速率、水化产物的形成和生长。减水剂主要通过改善水泥颗粒的分散性,提高水泥与水的接触面积,从而加速水泥的水化反应。同时,减水剂还可以影响水化产物的形成,例如,聚羧酸系减水剂可以促进C-S-H凝胶的生成,提高混凝土的早期强度。早强剂则主要通过提供离子或形成新的水化产物,加速水泥的水化反应,促进早期强度的形成。例如,硫酸盐早强剂可以提供硫酸根离子,与水泥水化产物中的铝酸钙反应,生成钙矾石(AFt),钙矾石的生成可以加速C3S的水化,提高早期强度。外加剂与水泥矿物成分的相互作用也是影响水泥水化过程的重要因素。不同的水泥矿物成分对外加剂的吸附能力不同,导致外加剂的作用效果也不同。例

如,C3A对减水剂的吸附能力较强,会降低减水剂的有效浓度,影响减水效果。因此,在使用外加剂时,需要考虑水泥的矿物成分,选择合适的外加剂种类和掺量。

(三) 外加剂对混凝土孔结构和微观形貌的影响

外加剂对混凝土孔结构和微观形貌的影响直接关系到混凝土的强度和耐久性。减水剂可以通过降低水灰比,减少混凝土中的孔隙率,改善孔径分布,使孔径向小尺寸方向发展,从而提高混凝土的密实度和强度。同时,减水剂还可以改善水化产物的微观形貌,使C-S-H凝胶更加均匀、致密,提高混凝土的强度和耐久性。引气剂引入的气泡可以细化混凝土的孔径分布,提高混凝土的抗冻性和抗渗性。早强剂可以促进水化产物的早期生成,填充水泥颗粒之间的空隙,提高混凝土的密实度和早期强度。缓凝剂可以延缓水泥的水化反应,避免混凝土内部产生过大的温度应力,减少裂缝的产生,提高混凝土的耐久性。因此,外加剂对混凝土孔结构和微观形貌的影响是多方面的,需要综合考虑外加剂的种类、掺量以及混凝土的配合比等因素,才能充分发挥外加剂的作用,实现混凝土性能的优化^[10]。

四、结语

混凝土外加剂通过调控水泥水化进程、改善混凝土孔结构和微观形貌,对混凝土的早期强度发展产生了显著的影响。深入理解外加剂的作用机理,对于优化混凝土配合比设计,提高混凝土的早期强度和耐久性具有重要的意义。未来,随着外加剂技术的不断发展和创新,将有更多高效、环保的外加剂被开发出来,为混凝土工程提供更加优质的材料选择。同时,也应持续关注外加剂对混凝土长期性能的影响,确保混凝土结构的安全和稳定。

参考文献

- [1] 续荣贵. 混凝土外加剂对混凝土的影响分析[J]. 现代装饰, 2022(34): 124-126.
- [2] 蓝豪杰, 蒋元海*, 黄发军, 等. 外加剂及胶凝材料对混凝土早期强度影响的研究[J]. 新材料·新装饰, 2021, 3(24): 7-9.
- [3] 穆黎明. 五种外加剂对混凝土早期开裂性能的影响[J]. 水电能源科学, 2020, 38(5): 3. DOI: CNKI: SUN: SDNY. 0. 2020-05-033.
- [4] 王冬, 石明建, 祝烨然, 等. 外加剂对泵送混凝土早期变形抑制作用研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(5): 4.
- [5] 赵凯, 王志学, 邓超, 等. 浅析混凝土外加剂对混凝土性能的影响[J]. Urban Architecture & Development, 2023, 4(3). DOI: 10.37155/2717-557x-0403-25.
- [6] 郭恒沙. 夏热冬冷地区冬季混凝土早期强度提升技术研究[J]. 建筑·建材·装饰, 2022(019): 000.
- [7] 向浩天, 蒋炳, 李之军, 等. 外加剂对低温水泥浆性能的影响试验研究[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2020, 47(1): 7.
- [8] 王连广, 王迎港, 李雪, 等. 外加剂对聚丙烯喷射混凝土强度的影响[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2022(002): 038.
- [9] 刘晓勇. 功能型化学外加剂对饰面清水混凝土性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2020.
- [10] 王亚坤. 高寒高海拔地区外加剂对混凝土力学性能的影响[J]. 中国建材科技, 2022, 31(5): 40-42.