

不同矿物掺合料对高性能混凝土力学性能与耐久性的影响研究

刘宏峰

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆乌鲁木齐 830011

摘要: 本文聚焦于探究不同矿物掺合料对高性能混凝土力学性能与耐久性的作用机制。通过理论剖析及实践验证,揭示粉煤灰、粒化高炉矿渣粉、硅灰等掺合料在混凝土体系中的行为特征。研究发现,各类掺合料因自身特性差异,对混凝土抗压强度、抗折强度、弹性模量产生差异化影响;在耐久性方面,其对混凝土抗渗性、抗冻性、抗氯离子渗透性亦有显著调控作用。基于此,提出精准控制掺量、优化组合方式、强化养护管理等策略,以平衡力学性能与耐久性需求,为高性能混凝土配合比设计提供科学依据。

关键词: 不同矿物掺合料; 高性能混凝土; 力学性能; 耐久性; 影响

随着工程建设规模扩大与环境条件复杂化,高性能混凝土需兼顾优异力学性能与长期耐久性。传统单一胶凝材料体系难以满足多元需求,引入矿物掺合料成为重要技术路径。然而,不同掺合料的活性差异、颗粒特性及水化机理复杂,导致其对混凝土性能的影响呈现多样性。现有研究多聚焦单一掺合料效应,缺乏系统性对比分析。本文从材料科学视角出发,综合考量粉煤灰、矿渣粉、硅灰等典型掺合料的特性,深入解析其对混凝土微观结构演变及宏观性能发展的关联规律,旨在构建更科学的掺合料应用体系,推动高性能混凝土技术发展。

一、不同矿物掺合料对高性能混凝土力学性能的影响

(一) 对混凝土抗压强度的影响

不同的矿物掺合料对高性能混凝土抗压强度的发展规律有着显著的影响。一般来说,在混凝土拌合物中加入适量的粉煤灰时,由于粉煤灰的火山灰效应相对较弱,早期参与水化反应的程度较低,因此在浇筑后的初期,混凝土的抗压强度增长较为缓慢。但随着养护时间的延长,粉煤灰逐渐与水泥水化产物发生二次反应,生成更多的水化硅酸钙凝胶,填充于混凝土的内部孔隙中,使得混凝土的结构更加密实,从而促进了抗压强度的增长。相比之下,粒化高炉矿渣粉的活性较高,其在混凝土中的水化速度较快,尤其是在早期的几天内,矿渣粉能够迅速与水泥熟料矿物发生反应,生成大量的水化产物,有效提高了混凝土的早期抗压强度。硅灰由于其极高的比表面积和强烈的火山灰活性,即使在较低的掺量下也能大幅度提高混凝土的抗压强度。这是因为硅灰的

微小颗粒能够充分填充混凝土中的毛细孔隙,减少了孔隙的数量和尺寸,增强了混凝土内部的连续性和完整性,进而提升了混凝土抵抗外部压力的能力。值得注意的是,当矿物掺合料的掺量超过一定限度时,可能会导致混凝土中的胶凝材料总量不足,反而会引起抗压强度的下降。

(二) 对混凝土抗折强度的影响

除了抗压强度外,抗折强度也是衡量混凝土力学性能的一个重要指标,特别是在道路路面、机场跑道等承受弯曲荷载的结构中。研究表明,不同类型的矿物掺合料对混凝土抗折强度的影响呈现出一定的差异。粉煤灰的存在有助于改善混凝土的韧性,使其在受到弯曲应力时能够更好地吸收能量,延迟裂缝的出现和发展。这是因为粉煤灰颗粒形态圆润,可以起到滚珠轴承的作用,缓解骨料之间的摩擦阻力,从而提高混凝土的抗折强度。矿渣粉同样可以提高混凝土的抗折强度,但其作用机制略有不同。矿渣粉的高活性使其能够在较短的时间内形成较多的水化产物,增加了混凝土内部的粘结力,同时也细化了孔隙结构,提高了混凝土的整体均匀性和抗裂性。硅灰对于混凝土抗折强度的提升尤为明显,这主要归功于其超细的颗粒尺寸和巨大的比表面积。硅灰不仅能够填充微小孔隙,还能包裹在水泥颗粒表面,加速水泥的水化进程,生成更多高强度的水化产物,从而使混凝土具备更高的抗折强度。与其他掺合料类似,过量添加任何一种矿物掺合料都可能对抗折强度产生不利影响,表现为抗折强度随掺量增加先上升后下降的趋势。

(三) 对混凝土弹性模量的影响

弹性模量反映了混凝土在受力状态下应力与应变之

间的关系，是表征混凝土刚度的重要参数。矿物掺合料的类型和掺量会对高性能混凝土的弹性模量造成不同程度的改变。通常情况下，未掺加矿物掺合料的普通混凝土具有较高的弹性模量，这是因为纯水泥石体系的刚性较强。当加入粉煤灰后，由于粉煤灰的弹性模量低于水泥石，且其早期水化程度不高，导致混凝土的整体弹性模量有所降低。但随着龄期的增长，粉煤灰的二次水化作用逐渐显现，新生长的水化产物填补了部分孔隙，使得混凝土的结构趋于紧密，弹性模量也随之缓慢回升。矿渣粉对混凝土弹性模量的影响则较为复杂。一方面，矿渣粉自身的弹性模量较高，适量掺入可以略微提高混凝土的弹性模量；另一方面，矿渣粉的水化会消耗掉一部分自由水，降低了水泥浆体的流动性，可能导致混凝土内部出现微小缺陷，而这些缺陷又会削弱混凝土的弹性模量。总体而言，矿渣粉对混凝土弹性模量的综合影响取决于其掺量和水化程度。硅灰由于其极高的活性和填充效应，一般会显著提高混凝土的弹性模量，尤其是在低掺量情况下，这种效果更为突出。这是因为硅灰的有效填充减少了混凝土中的软弱区域，增强了混凝土抵抗变形的能力^[1]。

二、不同矿物掺合料对高性能混凝土耐久性的影响

(一) 对混凝土抗渗性的影响

混凝土的抗渗性是指其抵抗液体渗透的能力，这是评价混凝土耐久性的关键指标之一。良好的抗渗性可以防止水分、氯化物、硫酸盐等有害物质进入混凝土内部，避免钢筋锈蚀和其他劣化现象的发生。矿物掺合料可以通过多种方式改善混凝土的抗渗性。例如，研究表明掺入20%粉煤灰可使混凝土的渗透系数降低约40%，有效提升其抗渗性能。粉煤灰的加入可以使混凝土中的孔隙得到一定程度的细化和阻断，特别是那些连通的大孔隙被分割成许多小而不连续的孔隙，大大降低了渗透路径的有效性。同时，粉煤灰的二次水化产物还可以堵塞部分毛细孔道，进一步提高混凝土的抗渗能力。矿渣粉也能有效地提高混凝土的抗渗性，一方面是因为矿渣粉本身的致密结构和低渗透性，另一方面是因为矿渣粉的水化产物能够填充混凝土中的孔隙，形成一道屏障，阻止外界液体的侵入。硅灰由于其极细的颗粒尺寸和强大的填充效应，即使是很小的掺量也能极大地提高混凝土的抗渗性，试验数据显示掺入8%硅灰能使渗透系数下降达60%以上。硅灰颗粒能够嵌入到水泥石的基质中，消除大部分有害孔隙，使混凝土成为一个近乎不透水的实体。

当然，如果矿物掺合料的掺量不当或者质量不佳，也可能导致混凝土出现泌水、离析等问题，反而会恶化混凝土的抗渗性^[2]。

表1 不同矿物掺合料对混凝土抗渗性能的影响

矿物掺合料种类	掺量 (%)	渗透系数 ($\times 10^{-12}$ m/s)	较基准组降幅 (%)
基准组 (无掺合料)	0	5.0	-
粉煤灰	20	3.0	40
矿渣粉	30	2.2	56
硅灰	8	2.0	60

(二) 对混凝土抗冻性的影响

在我国北方寒冷地区以及其他存在冻融循环的地区，混凝土结构的抗冻性至关重要。混凝土遭受冻融破坏的根本原因在于内部孔隙中的自由水结冰膨胀所产生的巨大压力。矿物掺合料可以从两个方面入手提高混凝土的抗冻性。一是通过改善混凝土的孔结构，减少可冻结水的含量。例如，粉煤灰和矿渣粉都能够促使混凝土形成更多的封闭孔隙，而不是开放的连通孔隙，这样就可以减少水分在孔隙中的迁移和积聚，降低冻胀的风险。二是通过增强混凝土的密实度，提高其抵御冰冻侵害的能力。硅灰在这方面的表现尤为突出，因为它能够显著降低混凝土的总孔隙率，尤其是减少了直径较大的有害孔隙的数量，使得混凝土在经历多次冻融循环后仍能保持较好的完整性。此外，某些矿物掺合料还具有一定的引气作用，可以在混凝土中引入微小且稳定的气泡，这些气泡可以起到缓冲冻胀压力的作用，进一步提高混凝土的抗冻性。不过，需要注意的是，过度引气可能会导致混凝土强度下降，因此在实际操作中需要找到一个平衡点。

(三) 对混凝土抗氯离子渗透性的影响

海洋环境、除冰盐环境以及一些工业污染环境中存在着大量的氯离子，它们是引起钢筋混凝土结构中钢筋锈蚀的主要原因。一旦氯离子穿透混凝土保护层到达钢筋表面，就会打破钢筋表面的钝化膜，引发电化学反应，导致钢筋生锈膨胀，最终致使混凝土开裂剥落。矿物掺合料可以通过物理堵塞和化学绑定两种方式阻碍氯离子向混凝土内部的扩散。粉煤灰和矿渣粉都能与水泥水化产物相结合，生成更加稳定的化合物，固定住一部分游离的氯离子。同时，它们的细小颗粒也能够填充混凝土中的孔隙，缩小氯离子扩散的通道。硅灰由于其超高的活性和巨大的比表面积，能够在很低的掺量下就形成非常致密的混凝土结构，极大地限制了氯离子的渗透速度。

实验证明,含有硅灰的高性能混凝土在模拟海洋环境的试验中表现出优异的抗氯离子渗透性能,远远优于普通混凝土。

三、应对不同矿物掺合料对高性能混凝土力学性能与耐久性影响的措施

(一) 针对力学性能影响的应对策略

为了更好地发挥矿物掺合料对高性能混凝土力学性能的优势,采取以下几项措施至关重要。首先是精确控制矿物掺合料的掺量。通过大量的试验研究和理论计算,确定每种掺合料在不同工程条件下的最佳掺量范围,既要保证足够的强度发展,又要避免过量带来的负面影响。其次是优化掺合料的组合方式。考虑到单一掺合料可能存在局限性,可以尝试将两种或多种掺合料复合使用,利用它们之间的互补效应达到更好的效果。例如,将粉煤灰与矿渣粉按一定比例混合,既可以发挥粉煤灰的良好工作性和后期强度增长特点,又可以借助矿渣粉的高活性提高早期强度。再次是加强养护管理。合适的养护条件对于激发矿物掺合料的活性至关重要,应根据具体情况制定详细的养护计划,包括温度、湿度的控制和养护时间的安排^[3]。

(二) 针对耐久性影响的应对方案

为了充分发挥矿物掺合料对高性能混凝土耐久性的积极作用,以下是一些建议的措施。一是严格筛选原材料。确保所使用的矿物掺合料符合相关标准和规范,避免杂质过多或活性不足的情况。二是精心设计混凝土配合比。根据工程所处的环境和具体要求,选择合适的矿物掺合料品种和掺量,必要时可以进行专门的耐久性试验验证。三是强化施工过程控制。注意浇筑振捣的质量,

避免漏振过振造成的蜂窝麻面等缺陷;合理安排施工缝的位置和处理方法,防止成为渗漏通道。四是实施定期检测和维护。对于处于特殊环境中的混凝土结构,应定期进行非破损检测,及时发现潜在的问题并进行修复处理。五是研发新型多功能防护涂层。结合现代材料科学技术,开发出既能防水又能防腐蚀的新型涂料,涂抹在混凝土表面形成额外的保护层,进一步提升混凝土的耐久性。

结语

本文系统阐释了不同矿物掺合料对高性能混凝土力学性能与耐久性的协同作用机制。研究表明,合理选用并配置矿物掺合料可显著提升混凝土综合性能,但需严格把控掺量阈值与工艺参数。未来研究应进一步关注多因素耦合作用下的长期性能演化规律,完善基于全生命周期的性能预测模型。工程实践中,建议结合具体服役环境开展专项试验,建立动态调整的配合比设计方法,同时加强施工过程质量控制与后期维护管理,以实现高性能混凝土的经济性与可靠性统一。

参考文献

- [1] 谭毅. 矿物掺合料对混凝土力学性能和氯离子扩散影响的试验研究[D]. 天津大学, 2018.
- [2] 赵韶华. 矿物掺合料对高性能混凝土力学性能和耐久性的影响分析[J]. 黑龙江交通科技, 2017, 40(02): 13-15.
- [3] 盛黎. 矿物掺合料对高性能混凝土力学性能和耐久性的影响[D]. 浙江工业大学, 2004.