

高性能水泥混凝土关键技术研究

丁文超 吴 凯

宁波交通工程建设集团有限公司 浙江 宁波 315000

摘 要：本文深度剖析高性能水泥混凝土关键技术。在原材料选择与配比设计上，明确水泥、骨料、掺合料的选择原则，强调水胶比、骨料比等参数对性能的影响。拌合与施工工艺中，阐述拌合设备、时间、温度的控制要点，以及浇筑、振捣、养护等环节对性能的作用。增强与改性技术方面，探讨纤维增强、预应力技术的应用，分析微纳材料和化学外加剂的改性效果。

关键词：高性能水泥混凝土；关键技术；配合比设计

引言：在现代土木工程发展的背景下，各类建筑结构对混凝土性能的要求越来越严苛。普通混凝土在强度、耐久性、工作性等方面的局限性逐渐凸显，难以满足高层建筑、大跨度桥梁、海洋工程等复杂工程的需求。高性能水泥混凝土应运而生，它以耐久性为核心设计指标，兼顾工作性、强度、体积稳定性和经济性等多方面性能，在提升建筑结构安全性与使用寿命上优势显著。

1 高性能水泥混凝土概述

高性能水泥混凝土是一种新型高技术混凝土，在现代土木工程中发挥着关键作用。它在大幅度提升普通混凝土性能的基础上，采用现代混凝土技术制备而成。其定义在不同国家和标准中有一定差异，但综合来看，高性能水泥混凝土以耐久性作为设计的主要指标，同时兼顾工作性、适用性、强度、体积稳定性和经济性等多方面性能。高性能水泥混凝土具备诸多优异性能。在耐久性方面，拥有高抗渗性，能有效阻挡水分和有害物质的渗透，防止混凝土内部钢筋和结构被侵蚀；高抗冻性使其在寒冷环境下，能抵抗冻融循环的破坏，维持结构的完整性和稳定性；高抗化学腐蚀性得益于其高密实性和低渗透性，对化学物质的侵蚀有较强抵抗能力，这些特性大大延长了其使用寿命。工作性上，它流动性良好，能满足不同施工条件下的浇筑需求；抗离析性优异，可保持混凝土成分均匀，避免分层和离析现象；自密实性使其在浇筑时能自动填充模板空隙，形成密实结构。在体积稳定性方面，高性能水泥混凝土干缩值小，固化后尺寸稳定性好；徐变变形显著低于普通混凝土，有利于维持结构长期稳定；对温度变化敏感性低，在不同温度环境下性能稳定，且弹性模量较高，能承受较大变形而不破坏。强度上，抗压强度突出，能满足高强度结构需求，抗拉强度与抗压强度比值相较于高强混凝土有明显增加，早期强度发展较快，有利于缩短施工周期、提高

施工效率。

从技术路线发展来看，高性能水泥混凝土经历了多个阶段。起初，为了制备高强度混凝土，在高效减水剂被引入之前，业界通过降低水灰比、实施强烈的振动加压成型，以排出混凝土中的气泡和多余水分，从而降低孔隙率。然而，这种方法不便于现场施工，主要应用于混凝土预制板和桩的生产，并且常常与蒸压养护结合使用^[1]。自20世纪50年代末高效减水剂的发明，高强混凝土的发展步入新纪元。通过常规工艺添加高效减水剂来降低水灰比，能够制造出流动性好、抗压强度达到60-100MPa的高强混凝土，但仅依赖高效减水剂的混凝土存在坍落度损失较严重的问题。到了20世纪80年代，矿物外加剂成为提升混凝土性能的关键因素，与高效减水剂共同作用。目前，制备高性能水泥混凝土的主要技术手段是结合使用高效减水剂和矿物外加剂，例如硅灰、细磨矿渣微粉、超细粉煤灰等，这些微粉的填充作用能够形成微观的紧密结构，优化界面结构，增强界面粘结力。高性能水泥混凝土在高层建筑的应用中，因其卓越的强度，能够减小结构构件的尺寸，扩展使用空间，提升建筑的稳定性和安全性；在大跨度桥梁的建设中，它满足了对于结构承载力和耐久性的严格要求；在海洋工程领域，其抗海水侵蚀的特性有助于延长跨海大桥和海上平台等设施的使用寿命，减少维护费用；而在寒冷地区，其出色的抗冻融性能确保了道路、桥梁等基础设施在反复冻融环境下的结构完整性。

2 高性能水泥混凝土关键技术分析

2.1 原材料选择与配比设计

2.1.1 原材料选择原则

(1) 水泥：高性能水泥混凝土优先选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，它们具备良好的稳定性和强度发展特性。水泥强度等级需与混凝土设计强度适配，C50 -

C60强度等级混凝土, 42.5强度等级水泥较合适; C80以上强度等级混凝土, 应采用52.5强度等级水泥。同时, 需严格把控水泥用量, 避免因水泥用量过多导致混凝土内部水化热过高, 引发温度裂缝, 影响混凝土的体积稳定性与耐久性。(2) 骨料: 粗骨料应选用级配合理、粒形良好、质地均匀坚固、线胀系数小且坚硬耐久的石灰岩、花岗岩等碎石、碎卵石或卵石, 其压碎指标应不大于10%, 最大粒径需依据混凝土结构类型、钢筋间距和施工工艺等因素合理确定, 防止过大影响施工与混凝土性能。细骨料宜采用细度模量在2.6 - 3.2之间的天然河砂, 严格控制含泥量、粒形以及石英含量, 确保其质量稳定。若采用人工砂, 更要注意控制砂子的级配和含粉量。(3) 掺合料: 常见的掺合料有粉煤灰、磨细矿渣和硅粉等。粉煤灰能改善混凝土工作性, 降低水化热, 提高耐久性; 磨细矿渣可提高混凝土的早期和后期强度, 增强密实度; 硅粉具有极高的火山灰活性, 能显著提高混凝土的强度和耐久性, 但使用时需合理控制掺量, 防止其对混凝土收缩值、抗裂性和坍落度损失等产生不利影响。

2.1.2 配比设计的影响

(1) 水胶比: 水胶比是影响混凝土强度和耐久性的关键因素。较低的水胶比能提高混凝土的密实度, 增强强度和耐久性, 但过低会使混凝土工作性变差, 难以施工。需通过试验确定最佳水胶比, 在满足强度和耐久性要求的同时, 保证良好的施工性能。(2) 骨料比: 骨料比即粗、细骨料的比例, 对混凝土的工作性和强度影响显著。合理的骨料比可使骨料相互填充, 形成紧密堆积结构, 提高混凝土的密实度和强度, 同时改善工作性。若骨料比不合理, 可能导致混凝土离析、强度降低等问题。

2.2 拌合与施工工艺

2.2.1 拌合工艺

拌合设备的选择对高性能水泥混凝土质量至关重要。强制式搅拌机是常用设备, 如中联重科JS1500混凝土搅拌机, 其搅拌叶片多, 能在短时间内使物料充分拌合, 对于高性能混凝土, 搅拌35秒即可达到匀质状态, 效率远超普通搅拌机。此外, 还有重载行星式uhpc超高性能混凝土搅拌机, 可精准控制搅拌转速、温度和湿度, 为高品质搅拌提供技术保障。拌合时间需精准把控, 过短物料混合不均, 过长则可能导致混凝土性能劣化^[2]。一般而言, 应依据搅拌机类型、混凝土配合比及搅拌量确定, 通常控制在2~5分钟之间, 以确保混凝土的均匀性和稳定性。拌合温度同样不容忽视, 过高或过低都可能影响混凝土凝结时间与工作性。高温会加速水泥水

化, 使坍落度损失过快; 低温则可能延缓水化反应, 甚至导致混凝土受冻。因此, 需将拌合温度控制在适宜范围, 一般在10~30℃之间。

2.2.2 施工工艺的影响

浇筑时, 要根据混凝土流动性和浇筑部位特点选择合适方法。如大体积混凝土常采用分层浇筑, 防止混凝土内部温度过高; 薄壁结构则可能采用快速浇筑, 避免冷缝产生。还要控制浇筑速度, 过快可能导致混凝土离析, 过慢则影响施工效率和整体性。振捣是使混凝土密实的关键。合适的振捣设备和时间能排出混凝土内气泡, 增强密实度。振捣不足, 混凝土内部存在空隙, 强度和耐久性降低; 振捣过度, 会使骨料与水泥浆分离, 影响结构性能。养护是保证混凝土强度和耐久性的重要环节。混凝土浇筑后应及时养护, 一般采用洒水、覆盖保湿材料等方式, 养护时间不少于14天。通过保持适宜温湿度, 促进水泥充分水化, 防止混凝土因失水、温度变化产生裂缝。

2.3 增强与改性技术

2.3.1 纤维增强技术与预应力技术的应用

在高性能水泥混凝土中, 纤维增强技术是提升性能的有效手段。常见的纤维材料包括钢纤维、聚丙烯纤维等。钢纤维凭借自身高强度和高模量特性, 可显著增强混凝土的抗拉强度与抗弯能力, 常用于桥梁、机场跑道等承受较大荷载和冲击的结构中, 有效提升结构的抗冲击性和抗疲劳性, 延长使用寿命。聚丙烯纤维则能有效抑制混凝土内部裂缝的产生和发展, 增强其抗裂性能, 常用于水工结构、地下室等对防水抗裂要求较高的部位。预应力技术同样发挥着关键作用。它通过对混凝土施加预压应力, 使混凝土在承受外部荷载前内部就存在一定的预压应力状态, 从而抵消部分或全部由荷载产生的拉应力。在大跨度桥梁、大型水工结构等工程中, 预应力技术能有效提高混凝土结构的抗裂性和承载能力, 减少结构变形, 确保结构在长期使用过程中的安全性和稳定性。

2.3.2 微纳材料与化学外加剂的改性效果

微纳材料如纳米二氧化硅、纳米碳酸钙等, 因其极小的粒径和巨大的比表面积, 能填充混凝土内部的微小孔隙, 改善水泥石与骨料之间的界面结构。纳米二氧化硅可与水泥水化产物发生火山灰反应, 生成更多的凝胶物质, 提高混凝土的密实度和强度, 同时增强其抗渗性和耐久性。化学外加剂种类丰富, 各自发挥独特作用。减水剂能在不增加用水量的情况下, 大幅提高混凝土的流动性, 方便施工操作, 还能降低水胶比, 提升混凝土

强度和耐久性；引气剂引入的微小气泡，可改善混凝土的和易性，提高抗冻性，尤其适用于寒冷地区的工程；缓凝剂能延缓水泥水化速度，避免混凝土在高温环境或大体积混凝土施工中过早凝结，保证施工的顺利进行；早强剂则加速混凝土早期强度发展，缩短施工周期，提高施工效率。

3 高性能水泥混凝土制备工艺

3.1 搅拌工艺

搅拌是高性能水泥混凝土制备的关键环节，目的是使各组成材料均匀混合，形成工作性和均匀性良好的混凝土拌和物。搅拌工艺包括搅拌设备选择、搅拌时间控制和搅拌顺序确定等。搅拌设备选用强制式搅拌机，搅拌效率高，能使各组成材料充分混合。搅拌时间根据搅拌机类型、混凝土配合比和搅拌量等确定，不宜过短或过长。过短则混合不均匀，影响性能；过长会导致坍落度损失增大，工作性变差。搅拌顺序一般为先干拌水泥、矿物掺合料、骨料等一段时间，再加入水和外加剂湿拌，使水泥和矿物掺合料充分分散在骨料表面，提高均匀性。

3.2 运输工艺

混凝土运输是将搅拌好的拌和物从搅拌地点输送到浇筑地点的过程，运输中要保证工作性和均匀性，避免离析、泌水等现象。运输设备根据运输距离、运输量和施工条件等选择，常用的有混凝土搅拌运输车、自卸汽车和泵送设备等。混凝土搅拌运输车适用于长距离运输，运输中可搅拌，保持均匀性。自卸汽车适用于短距离运输，但要防止离析。泵送设备适用于垂直和水平运输距离较大的情况，能直接将混凝土输送到浇筑地点，提高施工效率。运输过程中控制好运输时间，避免停留时间过长导致坍落度损失过大，影响施工性能。同时保持运输设备清洁，防止杂质混入。

3.3 浇筑工艺

浇筑是将混凝土拌和物浇筑到设计位置，形成符合设计要求的混凝土结构的过程。浇筑工艺直接影响混凝土密实性和结构质量^[3]。浇筑前检查模板、钢筋等，确保

符合设计要求，清理模板内杂物和积水。浇筑时根据混凝土流动性和浇筑部位特点选择合适方法。大体积混凝土和流动性较大的混凝土，可采用分层浇筑、分段浇筑或斜面浇筑等方法，保证浇筑质量。浇筑中注意振捣，使混凝土充分密实，避免蜂窝、麻面等缺陷。振捣设备选用插入式振捣器、平板振捣器或附着式振捣器等，振捣时间和频率根据配合比和浇筑部位等确定。

3.4 养护工艺

养护是高性能水泥混凝土制备的重要环节，对强度发展、耐久性和体积稳定性等影响重大。养护目的是为混凝土提供适宜温度和湿度条件，使水泥充分水化，促进强度发展，防止因失水、干燥和温度变化等产生裂缝。养护方法有自然养护、蒸汽养护和洒水养护等。自然养护在常温下，通过覆盖草帘、麻袋等保湿材料，定期洒水保持表面湿润。蒸汽养护将混凝土构件置于蒸汽养护室内，通过蒸汽加热使其快速硬化。洒水养护直接在混凝土表面洒水保持湿润。养护时间根据混凝土配合比、水泥品种、环境温度和湿度等确定，一般普通硅酸盐水泥配制的混凝土养护时间不少于7d，掺缓凝型外加剂或有抗渗要求的混凝土养护时间不少于14d。

结束语：综上所述，高性能水泥混凝土关键技术在于原材料选择、配比设计、拌合施工工艺以及增强改性技术等方面取得了显著成果。合理选择原材料、精准把控配比参数、优化施工工艺以及恰当运用增强改性技术，能够有效提升高性能水泥混凝土的性能。在实际工程应用中，高性能水泥混凝土凭借其优异性能，已在众多领域发挥重要作用。

参考文献

- [1]陈金兰.公路工程高性能混凝土试验检测关键技术分析[J].交通世界,2024(7):75-77.
- [2]郑濠金.高性能水泥混凝土配比性能的试验检测研究[J].中国水泥,2024(12):72-74.
- [3]刘华勋.基于高性能混凝土再生集料的水泥稳定碎石力学性能研究[J].福建建材,2024(5):19-22.